

Science & Technology Trends

科学技術動向

2

2010
No.107



レポート

p2.9

土壌汚染対策の現状と将来展望

p3.20

海洋酸性化研究の動向

トピックス

ライフサイエンス分野

p4

帯状疱疹に伴う痛みの
メカニズム解明

ナノテク・材料分野

p6

表面の原子像が観察できる
電子顕微鏡

ものづくり分野

p8

ライトフィールドカメラと
液晶ディスプレイの融合映像デバイス

情報通信分野

p5

デジタル放送のミリ波無線伝送
システムが稼働

エネルギー分野

p7

我が国初の
電気コミュニティバスの路線運行

科学技術動向

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産学官から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】03-3581-0605 【FAX】03-3503-3996

【URL】<http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】stfc@nistep.go.jp

土壌汚染対策の現状と将来展望

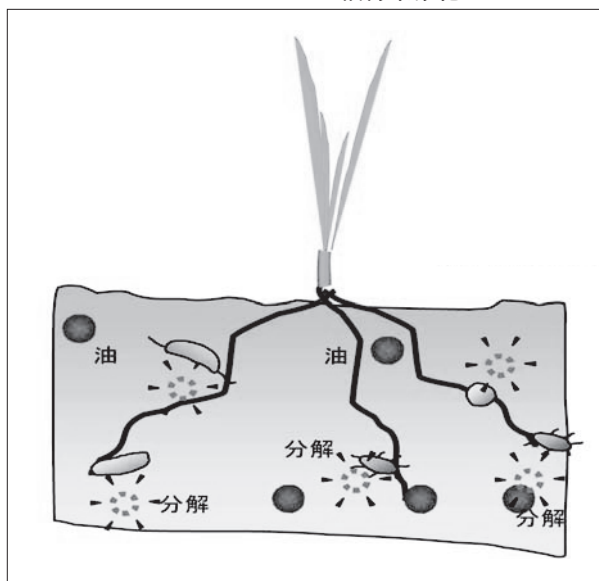
土壌汚染は典型七公害のひとつである。大気や公共用水域の汚染の場合に比べて、土壌は一旦汚染されると希釈効果があり期待できない。

我が国では、土壌汚染によるリスクの低減を図るため、2002年に「土壌汚染対策法」が制定された。同法は、土壌汚染による健康被害を未然に防止するという目的で、汚染の調査や処置方法を定めたものである。これまで同法に定められた手順で調査が行われ、汚染土壌の浄化を施した例も多く報告されている。しかし一方で、土壌の汚染が原因で土地の売買契約に影響が生じた例も報告されている。これは主に汚染を除去する費用が売買価格を上回る場合であるが、このような場所では立入禁止や拡散防止などの処置にとどめ、売買をせずに現状を維持することが多い。このような「土壌汚染によって、本来その土地が持つ価値よりも著しく低い用途にしか使われない、あるいは全く利用されない土地」のことを、ブラウンフィールドと呼んでいる。ブラウンフィールドの増加は、環境問題のほか、地域経済への影響、さらには国民生活への影響も懸念される。

汚染された土地が使用されないことは、国土の狭い我が国にとって大きな損失である。したがって低コストの浄化工法や、より確実な浄化を目指す技術の確立と、合理的な観点での土壌汚染対策を進めることが求められている。

対策の1つとして、安価な浄化工法であるファイトレメディエーションが注目されている。草本類や木本類の植物、根圏微生物を用いて、土壌、底泥、地下水等の汚染物質を低減、あるいは流出を抑制する方法である。また、汚染土壌をこの世から失くすことはできないまでも、汚染物質に起因した悪影響の可能性を、人の健康に問題の出ないレベルまで下げることが重要である。環境リスクを許容範囲内に抑制するための、環境リスク評価に関する研究の進行が期待される。

ファイトレメディエーションによる油汚染浄化



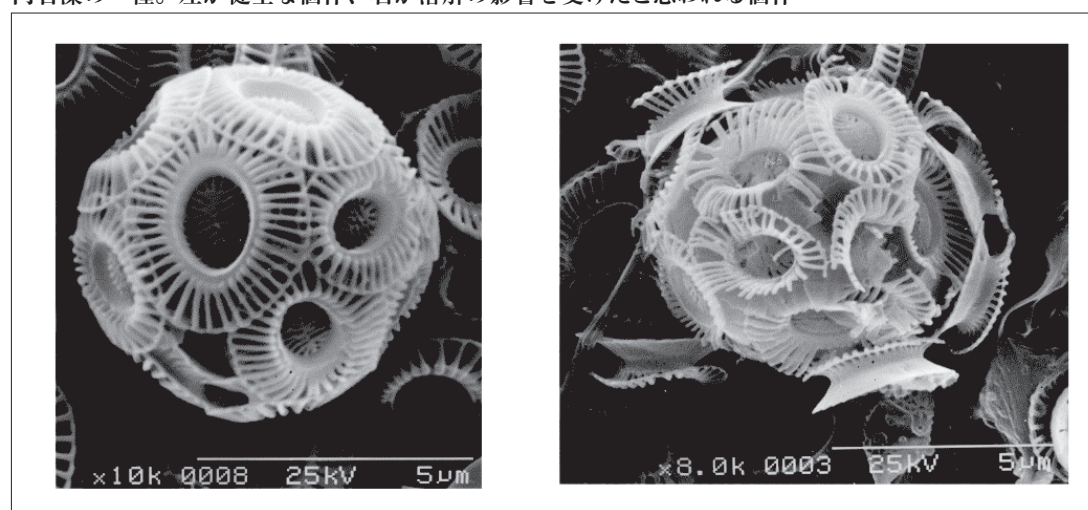
出展：参考文献¹⁵⁾

海洋酸性化研究の動向

地球温暖化の主たる原因とされている人為起源の二酸化炭素の増加は、温度上昇や海面の水位上昇のほか、海洋環境に与える影響も懸念されている。海洋表層には、炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物が生息している。海洋の表層は、一般に炭酸イオンもカルシウムイオンも十分に濃度が高く、固体の炭酸カルシウムが化学的に安定して存在できる状態にある。大気中の二酸化炭素濃度が増えると海洋にとけ込む二酸化炭素も増え、海洋の酸性化が進行し、海洋表層の生物がこれまでより炭酸カルシウムを生成あるいは維持しにくい環境となり、生態系に大きな影響を与える可能性がある。

近年、研究者コミュニティ等から相次いで酸性化の進行と生態系への懸念が表明されている。このような状況を踏まえ、欧州では、9カ国27の研究機関が参画し、海洋酸性化による生物学的・生態学的・地球化学的・社会学的影響の理解を深めるための4年間の研究計画“European Project of Ocean Acidification”が進んでいる。また米国では、海洋大気庁（NOAA）と全米科学財団（NSF）から委託を受けた全米科学アカデミーが包括的調査研究を実施している。我が国でも環境省地球環境研究総合推進費で海洋酸性化問題を主題に、現状把握のための観測や研究が実施されている。また海洋観測からは、日本近海では序々に酸性化が進行しつつあり、特に北極海においてはすでに未飽和海域がある等の結果が得られている。海洋酸性化が生物に及ぼす影響、ひいては我々の社会生活に及ぼす影響まで考慮すれば、生態学的基礎研究に加え社会学的視点の研究も必要であり、欧州に見られるような、社会的影響調査も視野に入れた分野横断かつ機関横断的な大規模研究の枠組みも必要である。

円石藻の一種。左が健全な個体、右が溶解の影響を受けたと思われる個体



出典：(独)海洋研究開発機構提供資料

富山大学と(独)理化学研究所の共同研究チームは、帯状疱疹に伴う痛みの発生メカニズムを世界で初めて解明し、米国のウイルス学雑誌 *Journal of Virology* の2010年2月号に発表した。帯状疱疹は、神経に沿った帯状の皮疹と強い痛みを伴う疾病である。小児期にかかった水ぼうそうのウイルスが原因で、体内に残ったウイルスが体力低下などをきっかけに活性化して増殖し発症に至る。これまで、痛みがどのように生じるのかは不明であったが、ウイルスの増殖で産生された抗体により働きが高まった脳由来神経栄養因子が、痛覚に関連する脊髄神経細胞を活性化させて痛みを生じることが明らかになった。この研究成果により、抗体や神経細胞に直接作用する、より有効な治療薬の開発が期待できる。

トピックス / 帯状疱疹に伴う痛みのメカニズム解明

帯状疱疹は、その名の通り、神経に沿った帯状の皮疹と強い痛みを伴う疾病として知られている。痛みは、帯状疱疹後神経痛として3ヶ月以上も続く場合がある。小児期にかかった水ぼうそうのウイルス(水痘帯状疱疹ウイルス。以下、VZV)が原因で、体内に残ったVZVが体力の低下などをきっかけに、活性化して増殖し発症に至ることがわかっている。その発症の割合は日本人で1000人中4.15人(70歳代では約8人)といわれている¹⁾。

帯状疱疹の発症原因はわかっているものの、痛みがどのように生じるのかこれまで明らかでなかった。この度、富山大学と(独)理化学研究所の共同研究チームは、帯状疱疹に伴う痛みの発生メカニズムを世界で初めて解明し、米国のウイルス学雑誌 *Journal of Virology* の2010年2月号に発表した²⁾。

共同研究チームは、脳由来神経栄養因子(以下、BDNF^注)が痛覚に関係するというこれまでの研究報告(参考の3)など)に着目、帯状疱疹の痛みにBDNFが関与しているという仮説のもとに、以下の4つの実験を行った。

1つめの実験では、VZVに対する抗体を人工的に作製し(以下、IE62抗体)、IE62抗体が本来反応すべきVZVに加えて、BDNFとも反応することを明らかにした。2つめの実験では、人工培養した神経細胞を使って、IE62抗体がBDNFの働きを増強することを示した。上記2つの実験により、IE62抗体とBDNFとの関わりが、試験管レベルで明らかになった。

さらに3つめの実験では、上記のIE62抗体が実際

に痛覚を起こすかどうかを、脊髄損傷痛覚モデルマウスを用いて調べた。IE62抗体をマウスに投与すると痛覚過敏が生じたことから、生体レベルでも、脊髄の神経細胞を介してIE62抗体とBDNFとの関わりがあることが示された。

4つめの実験では、帯状疱疹を起こしたヒトで、IE62抗体のような物質が実際に存在するかどうかについて、4人の患者の血清を調べたところ、VZVとBDNFの双方に反応する、IE62抗体と同様な抗体が検出された。

以上4つの実験から、帯状疱疹では、VZVの増殖によりVZVに対する抗体(IE62抗体)が産生され、その抗体により働きが高まったBDNFが、痛覚に関連する脊髄の神経細胞を活性化させ、痛みが生じるメカニズムが明らかになった。またBDNFの働きが高まることにより、痛覚過敏状態が続き、帯状疱疹後神経痛へとつながる可能性も示唆された。

帯状疱疹による痛みや帯状疱疹後神経痛に対して、既存の治療薬が十分に効かない例が報告されてきた。より有効な治療薬が待たれていたが、痛みがどのように生じるのかが不明であったため、治療薬開発の障害になっていた。この度の研究成果により、IE62抗体や痛覚に関連する神経細胞に直接作用する治療薬の開発が期待できる。

注：神経細胞の成長・生存維持・シナプス機能の亢進などを行うタンパク質。

参 考

- 1) Toyama N et al. *Journal of Medical Virology* 2009 Dec ; 81 : 2053-2058
- 2) Hama Y et al. *Journal of Virology* 2010 Feb (Epub ahead of print on November 2009)
- 3) Coull JA et al. *Nature* 2005 Dec 15 ; 438 : 1017-1021

60GHz 帯のミリ波を利用して、BS/CS/地上デジタル放送を各家庭で受信する無線伝送システムが、2009 年 12 月 25 日から埼玉県内の大規模マンションで稼働した。デジタル放送難受信世帯の解消を目的に、総務省からの委託を受けてシャープ(株)が開発し、DX アンテナ(株)がシステム化して販売しているものである。ミリ波は指向性が強くかつ広帯域の使用が可能で、特定の場所への大容量データ伝送に適している。このシステムは、屋外でミリ波通信を実際に定常的に利用する国内初めての例でもある。

トピックス 2 デジタル放送のミリ波無線伝送システムが稼働

2011 年 7 月のデジタルテレビ放送への完全移行に伴い、集合住宅でもその対応が進みつつある。しかし、アンテナやデジタルチューナを設置しても、同軸ケーブルや各戸への分配器が UHF 帯(地上デジタル波)やマイクロ波帯(BS/CS)に対応していないと、デジタル放送は受信できない場合もある。特に、築 20 年以上経過した集合住宅では、同軸ケーブルが老朽化していたり、アナログ放送用の VHF 帯ケーブルが使用されていることが多く、改修に手間が掛かっていた。

2009 年 12 月 25 日から 60GHz 帯のミリ波を利用して、BS/CS/地上デジタル放送を無線伝送して各家庭で受信するシステムが、埼玉県所沢市の大規模マンションで稼働した¹⁾。このシステムは、総務省からの委託^{注1)}を受けて、シャープ(株)が専用モジュールを 2009 年 1 月に開発し²⁾、DX アンテナ(株)がこれをシステムとして構築し 2009 年 7 月より販売しているものである^{3、4)}。

今回このシステムを導入したのは、築 36 年の 14 階建てマンションで、屋上の共同アンテナで受信した UHF 帯と BS/CS 帯^{注2)}の出力を、屋上に取り付けた送信機内のアップコンバータで 59.1～61.6GHz のミリ波に変換して、送信機で階下に向けて無線伝送する(図表)。各戸のベランダに取り付けた受信機でこのミ

リ波を受信し、もとの周波数に戻した後、同軸ケーブルで室内に配線する。今回のマンションの場合、送信機 6 台、近距離用の受信機 57 台、中距離用の受信機 101 台が使用された。

2000 年の電波法改正で、59～66GHz のミリ波は「特定小電力無線局」として、免許や許可・申請なしでも高品位な映像の多チャンネル伝送へ利用することが認められた。ミリ波は周波数が高いため、指向性が強くかつ広帯域の使用が可能であり、特定の場所に高品位テレビの大容量データを無線伝送するのに適している。このシステムの送信機は、2 次アンテナとして半円球のレンズアンテナを使用しており、送信ビーム幅は 7 度である。

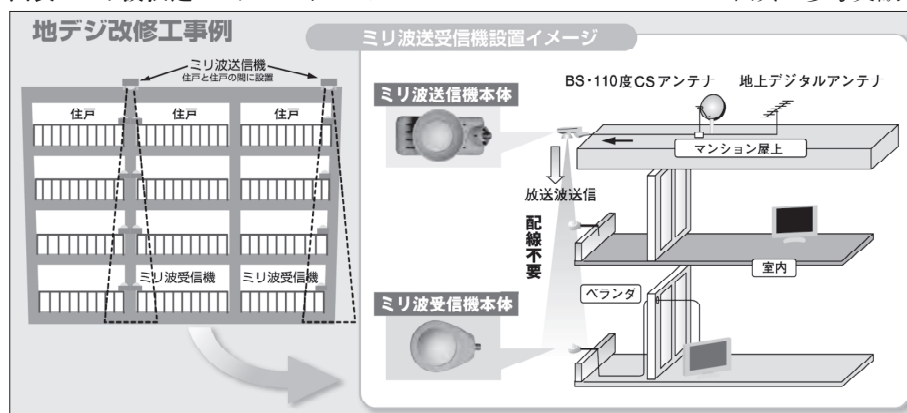
このミリ波無線伝送システムは、デジタル放送の難受信世帯の解消を目的としているが、屋外でミリ波通信を実際に定常的に利用する国内初めての例でもある。

注1：総務省の「電波資源拡大のための研究開発」事業の「ミリ波無線装置の低コストの小型ワンチップモジュール化技術の研究開発」

注2：BS/CSの放送周波数は、11.71～12.75GHzだが、パラボラアンテナに取り付けられた受信機で1.032～2.072GHzに変換されて出力される。

図表 ミリ波伝送システムのイメージ

出典：参考文献⁴⁾



参 考

- 1) DX アンテナ(株)発表(2009.12.25) : <http://www.dxantenna.co.jp/news/contents/76.html>
- 2) シャープ(株)発表(2009.1.23) : <http://www.sharp.co.jp/corporate/news/090123-a.html>
- 3) シャープ(株)・DX アンテナ(株)共同発表(2009.7.13) : <http://www.sharp.co.jp/corporate/news/090713-a.html>
- 4) DX アンテナ(株)製品パンフレット : <http://www.dxantenna.co.jp/catalog/pdf/home/09724-2.pdf>

走査型電子顕微鏡 (SEM) は表面形状を簡便に観察できる極めて有効な手法として様々な分野で用いられているが、これまでは物質表面の原子ひとつひとつを観測することはできなかった。米国ブルックヘブン国立研究所と(株)日立ハイテクノロジーズの共同研究グループは、SEM に収差補正技術を用い、電気的および機械的安定性の改良を行った結果、世界最高の 0.1 nm 以下という分解能を達成し、表面の原子像を得ることに成功した。

トピックス 3 表面の原子像が観察できる電子顕微鏡

走査型電子顕微鏡 (SEM) は、観察サンプルの加工がほとんど必要なく、ミリメートルからナノメートルスケールに至るまでの広い分解能のダイナミックレンジで奥行きのある観察像を得られるため、物質の表面を観察する極めて有効な手法として、様々な分野で用いられている。しかし、これまでの SEM は原子像が観測できるほどの分解能は有していなかった。原子像が観測できる顕微鏡としては透過型電子顕微鏡 (TEM) があるが、物質内部の観察を行う目的に用いられる手段である。そこで、SEM において分解能を向上させて、表面のひとつひとつの原子まで観測する試みが続けられてきた。

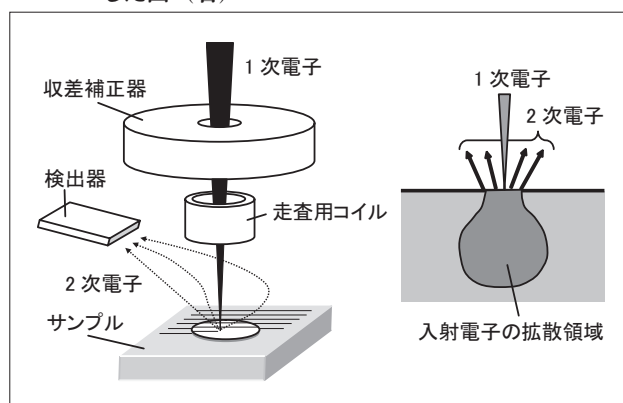
2009 年 10 月、米国ブルックヘブン国立研究所と(株)日立ハイテクノロジーズの共同研究チームは、SEM の大幅な改良を行い、物質表面の原子が区別できる 0.1 nm 以下の世界最高の分解能を達成したと報告した¹⁾。これまでの SEM の最高分解能は 0.4 nm であった。

高エネルギーの電子線 (1 次電子) を物質に照射すると、物質内の電子がはじき出される (2 次電子)。SEM は、電子線を照射する位置を走査しながら、はじき出される 2 次電子をモニターすることで表面の形状を観察する。ただし、1 次電子は入射後に物質内で拡散するため、1 次電子の照射スポットの大きさを小さくしても 2 次電子が放出される面積には下限があり、透過型電子顕微鏡のような原子スケールの観察ができなかった (図表 1)。そこで共同研究チームは、通常 (< 30kV) より高いエネルギー (~ 200kV) の 1 次電子に対して収差補正技術を用い、照射する電子ビームを ~ 0.1nm より細く絞り込むことを可能とした。収差補正は透過型電子顕微鏡の高分解能化にも有効性が確かめられている技術である。なお、1 次電子が高エネルギーであると、2 次電子は内殻電子から発生している可能性があり、内殻電子は原子に強く結びついているためサン

プル内部での電子の拡散が抑えられていると考えられる。共同研究チームは、さらに装置の電気的および機械的安定性の改良も施した。

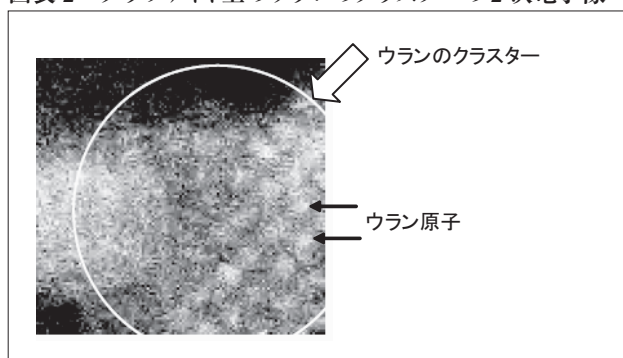
今回の発表では、観察例としてグラファイト上のウランクラスターの原子ひとつひとつが明瞭に分離して観察された (図表 2) ことが報告されている。

図表 1 SEM の構造の模式図 (左) と電子が物質内で拡散して、2 次電子が広い面積から放出されることを示した図 (右)



科学技術動向研究センターにて作成

図表 2 グラファイト上のウランのクラスターの 2 次電子像



出典：(株)日立ハイテクノロジーズ提供

参 考

- 1) Y. Zhu et al., "Imaging single atoms using secondary electrons with an aberration-corrected electron microscope" *Nature Materials*, Vol. 8, 808 (2009)

北陸電力(株)は(株)まちづくりとやま、富山地方鉄道(株)などと共同で、電気コミュニティバスの実証運行試験を実施している。経済産業省のモデル事業として採択され、2009年4月からリチウムイオン電池搭載の低床型電気コミュニティバスの開発を進めてきた。このバスは、従来のディーゼル車に比べて50%以上のCO₂排出量が削減でき、ばい塵や窒素酸化物などの排気ガスの排出もなく、騒音も低減される。この運行試験を通じて、運用性・経済性・耐久性、CO₂削減量などを検証し、市内の路線バスとして定着させることを目指していく。

トピックス4 我が国初の電気コミュニティバスの路線運行

北陸電力(株)はジェイ・バス(株)、(株)東京アールアンドデー、富山地方鉄道(株)、富山ライトレール(株)、(株)まちづくりとやま(富山市の第3セクター)と共同で、電気コミュニティバスの実証運行試験を実施している¹⁾。この電気バスは、経済産業省の「低炭素社会に向けた技術シーズ発掘・社会システム実証モデル事業」^{注)}として採択され、北陸電力などが2009年4月から開発を進めてきたものである。

今回開発した電気コミュニティバス(図表1)は、交通バリアフリー法(2006年12月施行)に適合した高齢者にも利用しやすい低床型市販車両をベースとし、乗客定員は28人である。また、車体の重量バランスと車軸の荷重を考慮して配置した4台のリチウムイオン電池(図表2)は、電気自動車用の急速充電器で充電することが可能であり、フル充電における走行可能距離は68km(計算値)で、最高速度は84km/h(実測値)となっている²⁾。このバスの走行によるCO₂排出量は、火力発電所での排出分を考慮しても、従来のディーゼル車に比べて50%以上削減される。勿論、ばい塵や窒素酸化物などの排気ガスの排出はなく、騒音も低減される。開発した電気コミュニティバスは、第1回EV・HEV駆動システム技術展に出展・公開された。公道での走行試験を行った上で、2010年2月から富山市内で富山地方鉄道(株)が運行するコミュニティバス「まいどはや」の一部路線(約7km)で実証運行試験を実施している。この運行試験を通じて、運用性・経済性・耐久性、CO₂削減量などを検証し、市内の路線バスとして定着させることを目指していく。

環境性能の優れたバスとして、ハイブリッドバス(ディーゼルエンジン+モーター)、タービンEVバス(マイクログスタービン発電機+モーター)などが開発され、すでに運行している³⁾。ただし、今回のようなバリアフ

リー法に対応し、急速充電可能な電気バスの事業を目指した実証路線運行は、我が国では初のケースである。

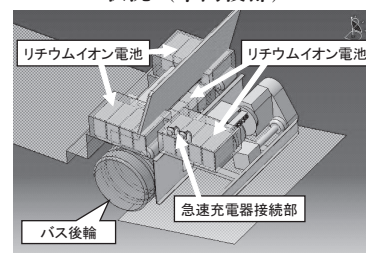
低炭素社会構築のためには、このような電気バスも含めた電気自動車の普及促進が不可欠であるが、急速充電器の設置数は2009年末全国で100カ所余りにとどまっている。今後、地方自治体や地元産業界などが連携して、充電インフラを整備・拡充していくことが求められる。

図表1 開発した電気コミュニティバスの外観



出典：北陸電力(株)提供資料

図表2 リチウムイオン電池の搭載状況(車両後部)



蓄電容量：48.8kWh(12.2kWh×4ユニット)、作動電圧/電流：350V/500A

出典：北陸電力(株)提供資料

注：地域社会を支える大学、産業界、自治体等が連携することで「低炭素社会」構築に必要な技術の地域ぐるみの実証を行い、ほかの地域へ普及、新たな社会システム構築を目的としたモデルとなる取り組みを支援する事業。

参 考

- 1) 北陸電力(株)プレスリリース：<http://www.rikuden.co.jp/press/attach/10011801%20.pdf>
- 2) 森野他、「低床型電気コミュニティバスの開発と環境モデル都市 富山での実証運行」、人と環境にやさしい交通をめざす全国大会講演論文集(2009)
- 3) 例えば、日の丸リムジンホームページ：<http://www.hinomaru.co.jp/metrolink/bus/index.html>

2009年12月に横浜で開催された SIGGRAPH ASIA 2009 で、マサチューセッツ工科大学とブラウン大学の研究グループはライトフィールドカメラと液晶ディスプレイを融合した映像デバイスに関する発表を行った。本来は映像を表示するために使用する液晶マスクを、カメラの液晶絞りとシャッターに適用することにより、1台のフラットパネルデバイスで映像表示と撮影をほぼ同時に可能にしている。この映像デバイスにより、視線ずれのないインターネットテレビ電話のほか、ライトフィールドカメラから得られる距離情報を用いたモーションキャプチャデータや光源情報を利用したアプリケーションなどが実現できる。

トピックス 5 ライトフィールドカメラと液晶ディスプレイの融合映像デバイス

2009年12月に横浜で開催された SIGGRAPH ASIA 2009 で、マサチューセッツ工科大学とブラウン大学の研究グループはライトフィールドカメラと液晶ディスプレイを融合した映像デバイスに関する発表を行った¹⁾。PC・Webカメラ・携帯電話を用いたインターネットテレビ電話では、カメラとディスプレイの光軸が一致しないため、ディスプレイを見ている状態ではカメラで撮影した顔画像の視線がずれてしまう。ハーフミラーを用いてカメラとディスプレイの光軸を合わせた装置も開発されているが、装置を小型化できないという問題があった。カメラとディスプレイを融合した新しいデザインの映像デバイスでは、視線ずれのないインターネットテレビ電話のほか、ライトフィールドカメラの機能²⁾を利用したアプリケーションなどが実現される。

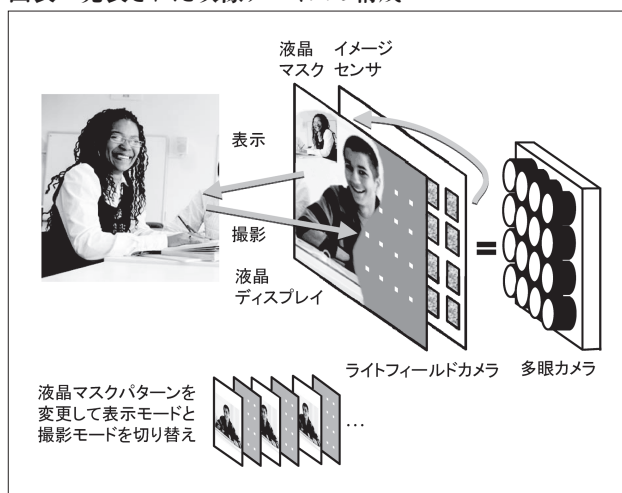
発表された映像デバイスの構成を図表に示す。この映像デバイスの特徴は、本来は映像を表示するために使用する液晶マスクを、カメラの液晶絞りとシャッターに適用している点にある。液晶マスクの背後にはイメージセンサがあり、液晶マスクをピンホールに相当するパターンにすることで、カメラのように撮影ができる。映像表示用と撮影用の液晶マスクパターンを交互に切り替えれば、1台のフラットパネルデバイスで映像表示と撮影がほぼ同時に可能になる。

ライトフィールドカメラは、通常のカメラにおける絞りの機構を拡張したものとみなすことができ、光学的には多眼カメラにより実現される。ライトフィールドカメラでは、様々な画角で焦点の異なった複数の画像を同時に撮影する。このような画像データを解析することによ

り、領域全体で焦点の合っている画像を生成できる。さらに、被写界深度を利用した距離計測や、画像データ解析による光源方向の推定もでき、従来のカメラでは得られない情報も取得できる。

発表された試作機では、イメージセンサの部分を通常の動画用カメラで代用しているために解像度が低く、ライトフィールドカメラ機能についてはまだ改善の余地があるものの、ライトフィールドカメラの機能により距離情報や光源情報が得られている。そこで、例えば、被写体との距離情報を用いたマーカーレスモーションキャプチャを応用したCGの物体操作や、ペンライトを動かすことでCGの光源設定をリアルタイムに変更するといった新しいアプリケーションが考えられている。

図表 発表された映像デバイスの構成



科学技術動向研究センターにて作成

参考

- 1) M. Hirsch, D. Lanman, H. Holtzman, and R. Raskar, BiDi Screen: A Thin, Depth-Sensing LCD for 3D Interaction using Light Fields, ACM Trans. Graph. 28, 5 (Dec. 2009), 1-9.
- 2) M. Levoy, Light Fields and Computational Imaging, IEEE Computer, 39, 8 (Aug. 2006), 46-55.

土壌汚染対策の現状と将来展望

武井 義久

環境・エネルギーユニット

1 はじめに

土壌汚染は典型七公害のひとつである。典型七公害とは、環境基本法に列挙されている7つの公害(大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭)の一般的な呼び方である。大気や公共用水域の汚染の場合には、拡散による希釈効果が期待されるため、原因物質の排出を規制することで一定の改善が期待できるが、土壌は一旦汚染されると希釈効果はあまり期待できない。ある時点で土壌汚染の原因物質が判明し、その排出を止めたとしても、そのままでは状態が改善されず、汚染が蓄積された状態が継続する。

このような土壌汚染によるリスクの低減を図るため、2002年に「土壌汚染対策法」が制定された。また、2006年に策定された第3次環境基本計画¹⁾において、土壌汚染の未然防止と回復および健全な土壌環境の維持を図るとの施策もあげられた。この計画では、環境問題の解決には、土壌だけでなく、大気、水という媒体を横断して問題を捉える観点や環境負荷の原因となっている人間活動の観点を十分念頭に置くことが必要とされている。これは土壌の汚染が、大気や水の汚染にもつながることを懸念しているためである。

土壌汚染に関しては、2002年に本誌²⁾において、当時の汚染状況や浄化技術、我が国の対策制度と欧米諸国の制度の比較などについて報告がなされた。その後、当時未整備であった土壌汚染対策法が制定されたほか、昨今は工場跡地の他用途への転換が多く見られ、土壌汚染問題が社会的にクローズアップされ、土壌汚染対策の重要性がさらに論じられるようになった。本稿では既報告以降の技術の動向や現状の課題についてまとめる。

2 土壌汚染に関する法整備と現状

2-1

土壌汚染に関係する法の整備

図表1のように、これまで土壌汚染に関係するいくつかの法律が整備されてきた。水質汚濁防止法は、最も早い時期に工場等から人の健康に被害のあるおそれのある物質を公共用水域へ排出させない

目的で制定されたが、本法は貴重な生活資源である地下水の水質管理という観点で重要なものである。土壌については、かなり遅く1990年代になってから環境基本法において、初めて土壌の汚染が「公害」と定義された。その後2002年に土壌汚染対策法が整備され、ここで汚染の拡散防止について定められた。公害の対策法は、汚染による健康被害が顕在化して大きな社会問題になったのを契機に制定され

たものが多い。しかし土壌汚染対策法は、予め土壌汚染による潜在的な健康リスクに対応するための、社会的なルールを作るという観点で制定されたという特徴がある³⁾。

土壌汚染が存在する土地に不特定多数の人が立ち入ることなどにより、人への健康影響が生じることを防ぐために、土壌汚染対策法には図表2に示した有害物質を取り扱う施設の廃止時に調査を実施すること、人の健康被害が生じる

図表1 土壤汚染に関する法律

名称	公布 (年・月)	土壤汚染に関する内容
水質汚濁防止法	1970.12	地下水質の常時監視、有害物質の地下浸透の禁止、汚染された地下水の浄化等が定められている。工事排水は水質汚濁防止法で規制されるため、土壤汚染箇所での工事は注意を要する。自治体は一律排水基準より厳しい上乗せ基準や規制項目以外の項目を追加する横出し排水基準を定めることができる。
農用地の土壤の汚染防止等に関する法律	1970.12	農用地が特定有害物質（カドミウム、銅、砒素）によって汚染された場合に、農用地土壤汚染対策地域に指定して農用地土壤汚染対策計画を定め、対策事業を行うことが定められている。
環境基本法	1993.11	人の健康を保護し、生活環境を保全するうえで維持することが望ましい基準として「土壤の汚染に係る環境基準」「地下水の水質汚濁に係る環境基準」が定められている。
ダイオキシン類対策特別措置法	1999.7	大気、水質、底質、土壤において、ダイオキシン類の汚染に係る環境基準が定められている。土壤の環境基準は 1,000pg-TEQ/g 以下。調査指標値として 250pg-TEQ/g（土壤の必要な調査を実施する濃度レベル）がある。
土壤汚染対策法	2002.5	特定有害物質、土壤汚染の状況調査、指定区域の指定、健康被害の防止措置、指定調査機関、指定支援法人等について定められている。

参考文献⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 土壤汚染対策法で定められている特定有害物質

第一種特定有害物質 (揮発性有機化合物、11物質)	第二種特定有害物質 (重金属等、9物質)	第三種特定有害物質 (農薬等、5物質)
四塩化炭素 1,2-ジクロロエタン 1,1-ジクロロエチレン シス-1,2-ジクロロエチレン 1,3-ジクロロプロペン ジクロロメタン テトラクロロエチレン 1,1,1-トリクロロエタン 1,1,2-トリクロロエタン トリクロロエチレン ベンゼン	カドミウム及びその化合物 六価クロム化合物 シアン化合物 水銀及びその化合物 セレン及びその化合物 鉛及びその化合物 砒素及びその化合物 ふっ素及びその化合物 ほう素及びその化合物	シマジン チオベンカルブ チウラム PCB 有機りん化合物

出典：土壤汚染対策法施行令

おそれのある汚染が判明した場合、必要な措置を取ることなどが定められている。

一般に土壤とは、陸地の表面を覆っている土や砂などを指すが、土壤汚染と言うと、単に汚染された土や砂だけではなく、汚染された土地という意味にも使われている。これは不動産の取引において、汚染状態が土地の価値に直結するためである。土地は水や大気と異なり、私有財の性格を持っているため、かつては汚染の実態が明らかにならないことが多かった。しかし、産業構造の変化による工場移転の増加や工場敷地の新規活用が活発になってきたことで、多くの情報が公開されることにつながり、社会的にも関心が高くなってきた。

2-2

土壤汚染対策法の概要

土壤汚染対策法は、土壤汚染の状況の把握に関する措置およびその汚染による人の健康被害の防止を目的に2002年に定められた。この法により、これまで明確でなかった土壤汚染の処置方法が定められた。以下に本稿関連部分を抜粋する。また、施行後に判明した諸問題の解決のために、2010年4月に土壤汚染対策法の適用範囲を拡充する法改正が予定されている。これについても、本稿関連部分のみを記載する。

1) 土壤汚染状況調査

以下に当てはまる土地が、法で

定めた調査の対象である。

- ① 使用が廃止された有害物質使用特定施設(有害物質を製造、使用、処理をする施設)の敷地であった土地
- ② 土壤汚染により人の健康被害が生ずるおそれがあると都道府県知事が認めた土地
- ③ 3,000m²以上の土地の形質変更(土石の掘削、宅地の造成、土地の開墾、掘削等によって土地の形状を変更すること)時において、土壤汚染のおそれがあると都道府県知事が判断した土地

土地の所有者は指定調査機関で調査した結果を都道府県知事に報告する義務を負う。指定調査機関とは、調査の信頼性を確保するため、技術的能力を有する調査事業者を環境大臣が指定するものである。なお、③は2010年の法改正から追加される予定のものである。

2) 指定区域の指定・台帳の調製

調査の結果、状態が基準に適合しない土地については、その区域を指定区域として指定・公示するとともに、指定区域の台帳を調製し、閲覧に供する。2010年の法改正後は、1)の義務的な調査だけでなく、土地の所有者の自主的な調査についても、土地所有者の希望・

申し出があれば、調査結果を管理することになる予定である。また都道府県知事による情報の収集、整理、保存、提供に関する努力義務も追加される予定である。

3) 土壌汚染による健康被害の防止措置

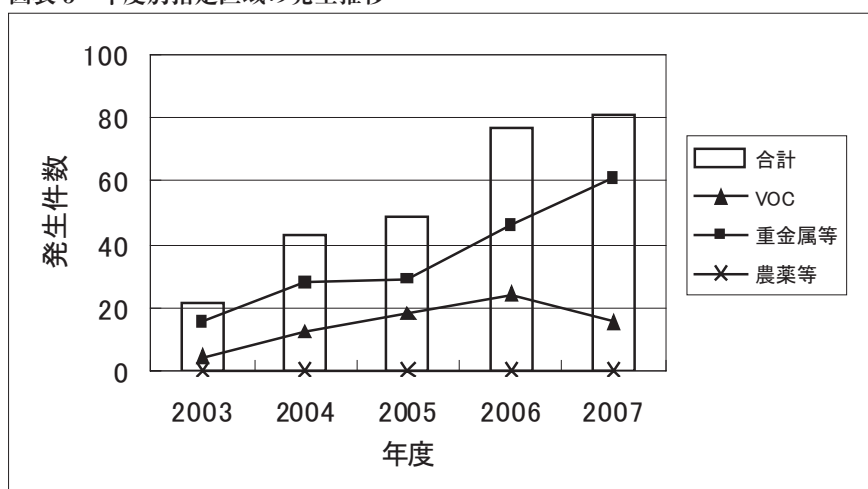
都道府県知事は、土壌汚染により人の健康被害が生ずるおそれがあると認めるときは、当該土地の所有者に対し、汚染の除去等の措置(立入制限・覆土・舗装、汚染土壌の封じ込め、浄化等)を講ずべきことを命ずることができる。

定された。このうち、揮発性有機化合物(第一種特定有害物質)のみの超過が73件、重金属等(第二種特定有害物質)のみの超過が179件、複合汚染(第一種特定有害物質、第二種特定有害物質双方とも基準超過)は18件であった。農薬等(第三種特定有害物質)の基準超過箇所はなかった。(本稿では以後第一種をVOC、第二種を重金属、第三種を農薬等と記載する。)

図表3は、土壌汚染対策法の施

行以後、同法に基づく調査の結果、基準超過が判明し指定区域となった箇所の発生推移である。年々増加の傾向が見られる。図表4は、2007年までの有害物質別に累積発生件数を示したもので、件数の多い物質は、六価クロム、鉛、ふっ素の順である。

図表3 年度別指定区域の発生推移



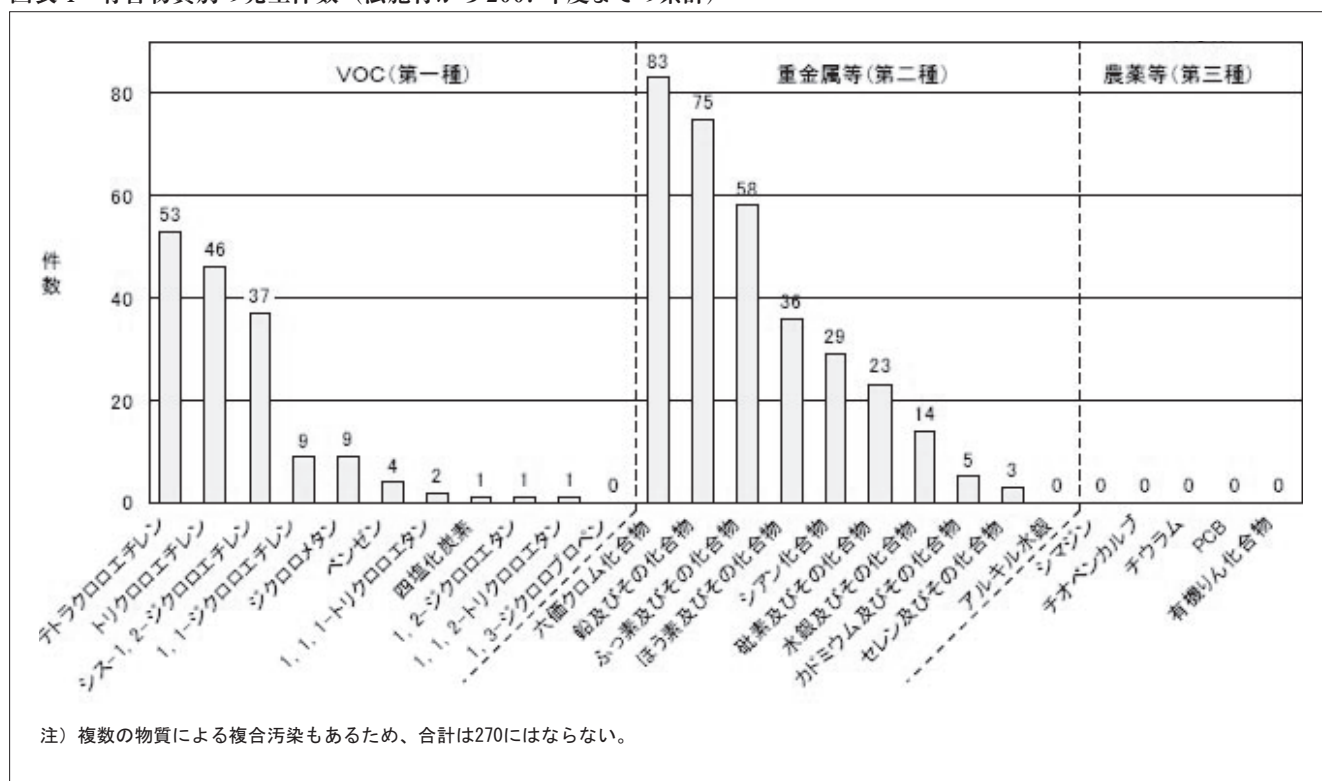
参考文献⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

2-3

法に基づく調査結果

環境省が土壌汚染対策法に基づく土壌汚染の調査結果⁵⁾をまとめている。現在のところ、2007年度までの結果が公表されており、累計で270件の調査箇所が、基準を超過しているとして指定区域に指

図表4 有害物質別の発生件数(法施行から2007年度までの累計)



参考文献⁵⁾

2-4

今後必要な法整備

この法律が将来にわたって維持されることで、汚染土壌の対策が

着々と進むものと考えられるが、この法律はあくまでも汚染土壌の調査の義務から始まる対策法であり、防止法ではない。現在、明らかになっている土壌汚染は、高度経済成長期の時代の負の遺産が主と考えられるが、現在も刻々と別

の汚染が進んでいる可能性もないとは言えない。我が国の企業では既にCSR（社会的責任）が浸透しており、土壌汚染を放置することは考えにくい。より確実にこの公害を防ぐ目的として、防止法の整備も求められる。

3 汚染土壌の浄化技術の進展

3-1

現状の問題点

3-1-1 ブラウンフィールド

2章で触れたように、土壌汚染対策法では、土壌汚染の可能性がある土地の汚染状況調査が義務付けられている。このほかに近年は、土地の取引や資産価値の評価等を目的とした自主的な調査も増加している。このように調査が実施される機会が増えることは、これまで見過ごされていた土壌汚染の実態が明らかになるという面で、望ましいことである。

図表5は、社団法人土壌環境センターが会員企業へのアンケートを基にまとめたデータである。同センターは、土壌汚染の調査および対策の事業に携わる、調査・分析会社、建設コンサルタント会社、建設会社等、159社(2009年12月現在)が参加する公益法人である。同センターでは、土壌汚染に関する様々な調査を行っているが、特に図表5のような会員企業へのアンケート等で得られるデータは、土壌汚染の実態を示す有用な資料である。2-3で「法に基づく調査結果」を記載したが、この図表5によると、法に基づく調査・対策より、土地の取引等を機に、自主的に調

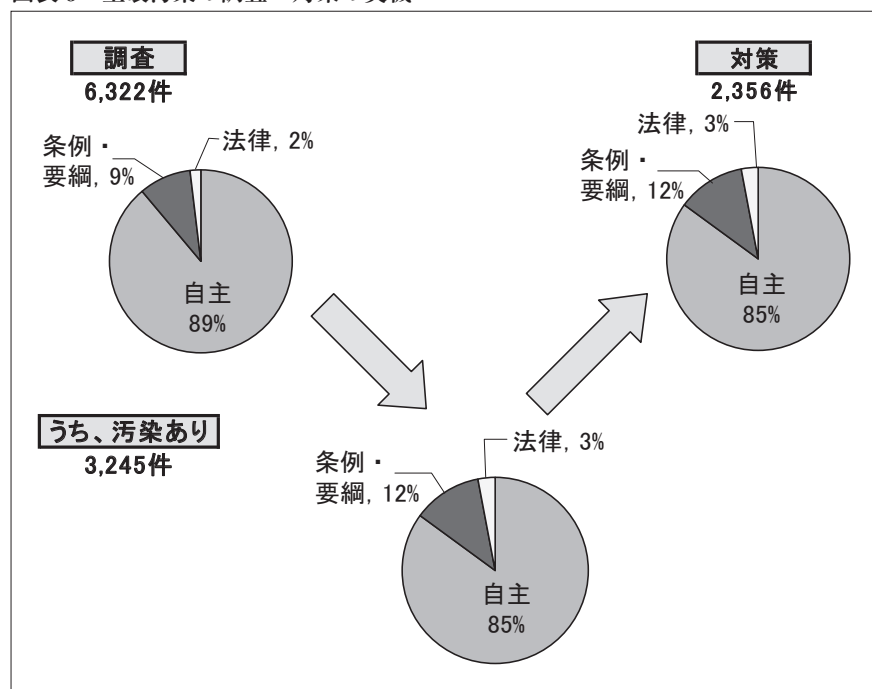
査・対策している事例が圧倒的に多いことがわかる。

例えば、法では汚染対象の有害物質は図表2の通り定められているが、自主的な調査での汚染対象は有害物質以外に油による汚染も含んでいる。近年、油汚染の件数が多く問題となっていることから、環境省は「油汚染対策ガイドライン⁶⁾」を作成し、調査や対策の方法を公開している。

この自主的な対策は、環境リスク回避のためというより、資産リスク回避のためといえるが、我が国の経済活動の維持においてはやむを得ない対策である。土地取引の場面では、土壌の汚染が原因で売買契約に影響が生じた例や、円滑な土地の利活用が進まない例も見られる。このような、「土壌汚染によって、本来その土地が持つ価値よりも著しく低い用途にしか使われない、あるいは全く利用されない土地」は、ブラウンフィールドと呼ばれる。

我が国では土壌汚染への取り組みの歴史が比較的浅いことから、現時点ではブラウンフィールドとなった土地は限られている。しかし、潜在的にブラウンフィールド化する可能性のある土地は多数存在すると見られている。ブラウンフィールドが増えると、環境問題となるだけでなく、地域の経済へ影響を与え、さらには地域住民の通常の生活へも影響を与えることが懸念される。

図表5 土壌汚染の調査・対策の契機



出典：参考文献⁷⁾

3-1-2 我が国のブラウンフィールドの実態

これまでに国内で多くのブラウンフィールドの事例⁸⁾が報告されている。代表的な事例を以下に示す。

①大都市圏における化学工場跡地

企業で土壌汚染対策法施行前に廃止した工場の跡地を売却して、住宅地、商用施設、事務所などとして利用する案が浮上した。しかし、敷地の一部に存在する土壌汚染を掘削除去すると、費用が膨大になるため、計画は実行に移されなかった。汚染物質を除去するのではなく、現場に封じ込める措置をしてから土地売却という選択肢もあるが、この条件での買い手を見つけるのは困難である。

②地方都市における機械工場

①と同様に企業で、土壌汚染対策法施行前に廃止した工場の跡地を売却する案が浮上した。しかし土壌の調査をすると汚染が見つかる可能性が高いと考えられ、その場合に必要な浄化の費用を捻出できる見込みがない。浄化が必要になることを恐れて調査を行わない状況が続いており、土地は利用されないままである。

3-1-3 ブラウンフィールドになりやすい土地

たとえ土壌が汚染されていても、その土地の経済評価が高ければ、対策が行われる可能性も高い。汚染対策費が土地取引額の3割以内ならば、土地の取引が成立している例が多い。大規模な土地の場合、全域にわたって著しく汚染されていることは少ないため、土地の売却額に占める対策費の割合が小さくなり、対策に着手できるケースが多くなる。よって地価が安く小規模な土地ほど、ブラウンフィールドになりやすいと考えられている⁸⁾。

3-2

既存の浄化技術

3-2-1 既存技術の概要

現在までの汚染土壌の対策技術をまとめると、図表6のようになる。汚染の対策としては、土壌を場外に一旦運び出した後に対策を施す方法と、搬出せずに汚染現場で対策を施す方法に大別される。

場外へ運び出された土壌は、然るべき処理場にて分解や固化などの処理が行われる他、最終処分場に埋設される場合もある。汚染物

質のうち、重金属は化学的な分解が不可能であるが、化学的に分解が可能なVOC(揮発性有機化合物)は浄化処理が行われる。

現場の状況によっては土砂を場外搬出せずに、浄化を行うことができる。これを原位置浄化という。原位置浄化は、低コストであるため、これまで多くの浄化事業者等が原位置での新たな工法の開発に注力してきた。図表7に主な原位置浄化工法をまとめた。ただし、万能な原位置浄化工法というものは存在しない。汚染物質の種類や地下水の状況等、現場の状況に応じて、適当な工法が選択される。状況によっては、原位置工法が全く適用できない現場もあり得る。いずれにしても、まずは現場の状況把握が浄化の成功の大きなポイントである。

3-2-2 原位置浄化の施工事例

原位置での浄化の事例として、ここではVOCによる土壌汚染を、バイオレメディエーションで浄化した例⁵⁾を紹介する。バイオレメディエーション(bioremediation)とは、生物を意味するbio-とラテン語で修復を意味するremediationとを結び付けた言葉で、汚染土壌中で微生物を活動させ、有害物質を分解する工法である。

図表6 土壌汚染対策技術の概要

処置場所	工 法		概 要	適用可能な有害物質		
				VOC	重金属等	農薬等
場外搬出	掘削土壌の浄化処理処理場にて浄化		化学的分解、生物処理 熱分解(シアン、農薬) 洗浄、熱脱着、揮発	○	×	○
	掘削土壌の封じ込め 処理場にて処理		遮断工、遮水工 不溶化・固化処理、 還元安定処理	—	○	—
原位置	原位置浄化	原位置分解	化学的分解、生物的分解	○	×	○
		原位置抽出	抽出、洗浄	○	○	○
	原位置封じ込め	地下遮水壁	不透水層と鋼矢板などによる封じ込め	—	○	—
		固化・不溶化	原位置注入・攪拌による 固化・不溶化処理	—	○	—

注) ○は適、×は不適、—は可能ではあるがあまり使われないことを示す

参考文献⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表7 主な原位置浄化工法

工 法		概 要
原位置抽出法	土壌ガス吸引法	空隙率の高い地層にある気化した汚染物質を真空ポンプ、ブロア等で吸引除去する。
	エアスパージング法	空隙率の高い地層や地下水に空気を圧入して、揮発性有機化合物の気化を促す。
	地下水揚水法	汚染地区の地下水を揚水し、地下水から汚染物質を除去、回収する。
	二重吸引法	二重吸引法は、地下水と土壌ガスを同時に吸引する。
原位置化学的分解法	酸化分解	地盤に過マンガン酸カリウムやフェントン（過酸化水素と鉄溶液）等の強力な酸化剤を投入し、揮発性有機化合物やシアンを分解する。
	還元分解	地盤に鉄粉等の強力な還元剤を投入し、揮発性有機化合物を還元的に分解する。
原位置生物的分解法	バイオレメディエーション	酸素や栄養塩類を地盤中に投入し、土着の分解菌を増殖させ、有機塩素化合物や油の分解を促進する。
	ファイトレメディエーション	植物を利用して土壌中の有害物質を回収、分解、不溶化する。カドミウム、鉛、砒素の回収に効果の高い植物や、揮発性有機化合物、油を吸収分解する効果の高い植物植物が報告されている。
原位置土壌洗浄		水または界面活性剤等を地盤に注入し、有害物質を抽出・除去する。有害物質を含んだ洗浄水を地下水と共に揚水し、水処理により有害物質を分離・回収する。

参考文献¹⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表8 電子機器関連業における VOC 汚染の事例

事業所の種類	電子機器関連業	調査の契機	企業方針による自主調査
使用が廃止された有害物質使用特定施設	トリクロロエチレンによる洗浄施設（法施行前に廃止）	敷地内地下水汚染	あり
敷地面積	18,000m ²	周辺の地下水汚染	あり
汚染面積	4,000m ²	敷地内への人の立ち入り	できない
汚染深度	約 15m	周辺での地下水の飲用利用	なし
基準を超過した特定有害物質等の種類		基準項目等	濃度
トリクロロエチレン		溶出量	基準の約100倍
シス-1,2-ジクロロエチレン		含有量	基準の約 10倍

出典：参考文献⁵⁾

VOC は汚染の程度にもよるが、原位置浄化が可能な場合も多い。以下の事例はバイオレメディエーションが適用可能であった典型例である。

電子機器関連業が工場の環境管理の一環として、自主的な土壌・地下水汚染の調査を実施したところ、テトラクロロエチレンおよびその分解生成物による土壌および地下水汚染が判明した。汚染の状況は図表8の通りであった。過去に部品洗浄のためトリクロロエチレン等を使用していたことから、操業当時に何らかの原因によって、トリクロロエチレンが地下に浸透し、蓄積したものと推定された。

当該事例については以下の理由から、バイオレメディエーションによる原位置浄化が最も経済的か

つ効率的と判断され、実施された。

- ・当該工場は操業中であり、建物下にも汚染があり、大掛かりな土木工事は困難である。
- ・汚染深度が 15m 程度と深く、掘削工事では莫大な費用がかかる。
- ・対象土壌中にトリクロロエチレンやその分解生成物を分解できる嫌気性細菌が存在していた。

バイオレメディエーションは、図表9のように、現場に掘った井戸などから栄養剤を注入し、土壌地下水中の細菌を増殖および活性化させ、VOC を分解する方法である。上記の事例では、浄化の対象範囲に9本の注入井戸を設置し、栄養剤の注入開始から、約1.5年で土壌と地下水が浄化された。当該箇所は浄化の後、関連会社に売却され、建物を建て替えた後、工

場として利用された。

3-3

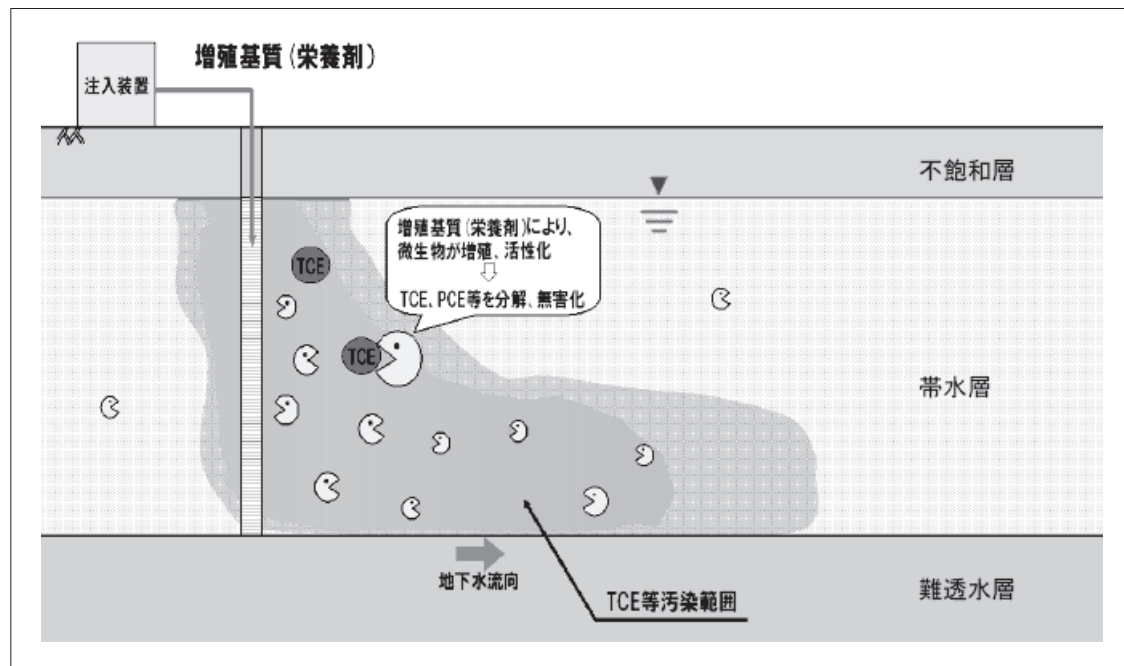
新しい土壌汚染対策技術の開発

3-3-1 汚染の拡散の予測

独立行政法人土木研究所をはじめとした多くの研究機関で、地下水等の影響による物質の拡散を予測（以下、移流拡散解析という。）するシステム開発が進められている。一部には開発した移流拡散解析のソフトを無償で公開している研究機関もあり、今後の効率的な浄化やモニタリングに役立って行くものと期待される。

土壌汚染の対策を的確に行うた

図表 9 バイオレメディエーションによる浄化



出典：参考文献⁵⁾

めには、汚染の進行状況や影響の確認が不可欠である。原位置浄化の記述でも触れたように、確実な浄化のためには、汚染の状況を如何に正確に把握し、適した浄化工法を選択するかが大きなポイントである。しかし諸般の事情で浄化工事が行われない場合でも、汚染状況の監視が必要である。物質によっては地下水等の影響により、移動や拡散してしまうものがあるからである。状況や影響の確認は、主に次の観点から行われる。

- ①汚染拡散の可能性(拡散しやすいのか)
- ②拡散速度(数ヶ月のオーダーか何百年のオーダーか)
- ③拡散可能性の範囲と方向
- ④周辺に保全する対象物がある場合、それに対する影響

図表 10 は移流拡散解析の例である。この条件で汚染源から汚染物質である鉛が溶出すると、汚染物質は地下水により拡散し、約 20 年後には 100m 離れた飲用井戸を汚染する可能性がある。このような予測結果が得られた場合は、いずれ汚染の対策が必要となる。

3-3-2 ファイトレメディエーション

現在までの国内での土壌汚染浄化のニーズは、図表 11 に示した通り、「高価で短期間」と「安価で長期間」の 2 つに大別できる。前者は土地の売買取引の期日が決まっている場合である。一方、後者は土地の売買取引の期日が決まっていない場合であり、浄化期間よりも工事費の安さを優先する場合である。どの工法でも経済的に見合わない場合は、ブラウンフィールドとなる。この対策のためには、より長い浄化期間を許容し、その代わり、かなり安価である浄化工法を開発しなければならない。

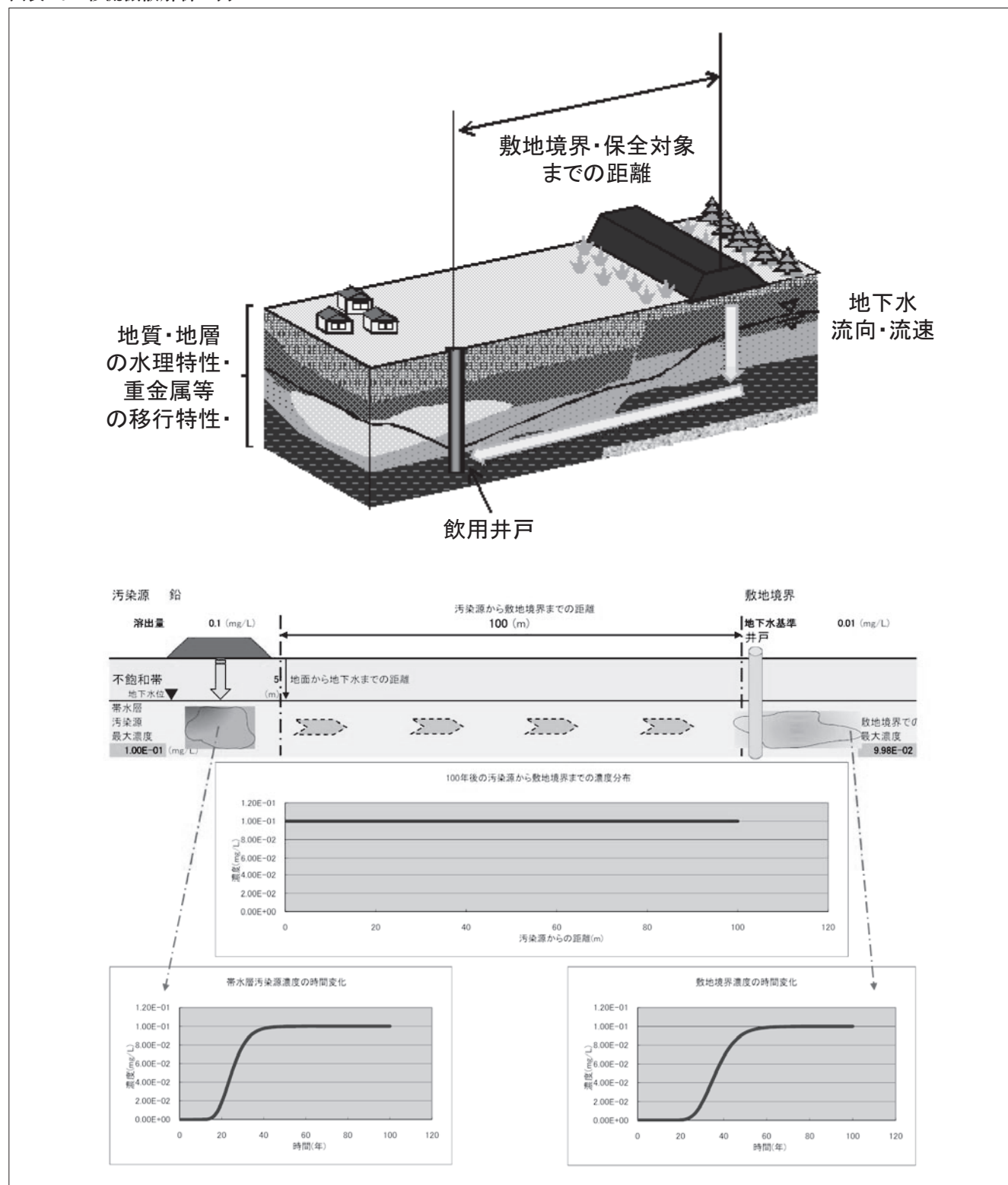
この、かなり安価という条件を満たす浄化方法として、ファイトレメディエーションが挙げられる。ファイトレメディエーション(phytoremediation)とは、ギリシャ語で植物を意味する phyto- とラテン語で修復を意味する remediation とを結びつけた言葉¹²⁾で、草本類や木本類の植物、あるいは根圏微生物を用いて、土壌・底泥・地下水等の汚染物質を低減、あるいは流

出抑制する方法である。植物の根が伸長する際、土を耕す効果があり、また、根から酸素や栄養分が土壌中に供給されるため、根の周りの微生物が活性化し、油などの分解を促進する。重金属汚染土壌の場合には、植物が土壌中の汚染物を吸収して、地上部へ移行するため、地上部を刈り取ることで土壌中の汚染を軽減することができる。

ファイトレメディエーションの長所として、コストが安いことのほか、化学薬品等を使用しないため環境に優しい、景観向上にも寄与する等が挙げられる。一方、短所は、浄化期間が長期に及ぶことのほか、浄化が根の届く範囲に限定されること、汚染物質を吸収した植物体の適切な廃棄が必要なこと、土地を植物が育成できる状態まで肥やしてやらなければならないこと等である。

ファイトレメディエーションの研究は古くから欧米では盛んであった。国内でも 10 年ほど前からファイトレメディエーションの研究の特許が出願されるようになった¹³⁾ほか、最近の学会等では研究事例が多く報告がされるように

図表 10 移流拡散解析の例



出典：(独)土木研究所提供データ

なった。遺伝子組み換え作物により重金属の蓄積能力を上げる研究例¹⁴⁾も報告されている。しかしながら、報告例はまだほとんどが実験レベルであり、実際の広大な汚染土壌を浄化した例は少ない。

ファイトレメディエーションは究極の低コスト浄化工法とも言わ

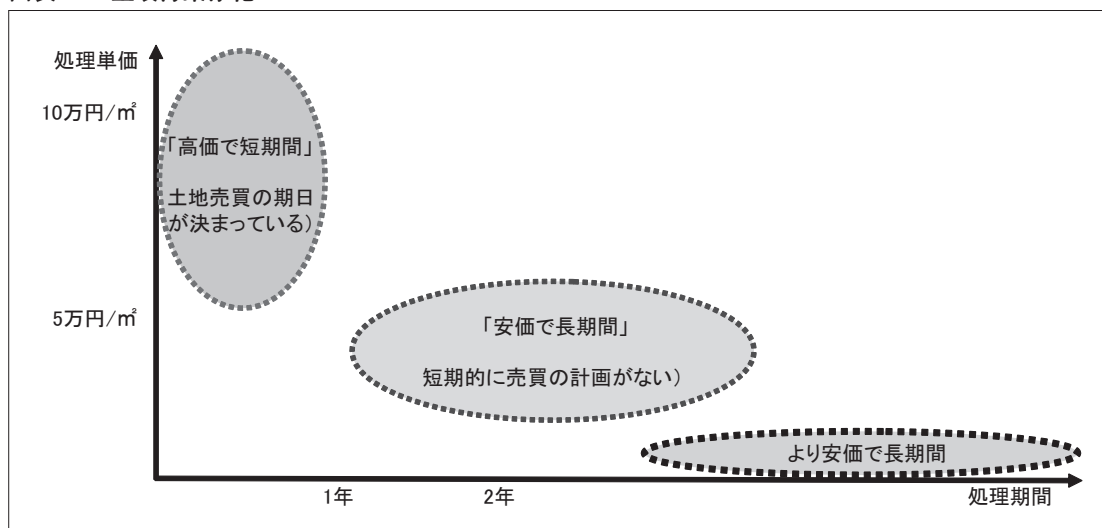
れることから、極力手をかけないことが特色であると誤解されている。しかし汚染区域の土壌は、畑とは大きく異なるため、通常の農業や造園業のノウハウだけでは、植物がうまく育たない。

例えば、油汚染を浄化する植物として「イタリアンライグラス」が

ある。この植物は牧草として一般的に栽培されているものである。しかし、油汚染土壌では、土壌中の空隙に油が入り込んでいるため、根が生育しにくく、微生物も繁殖しにくい。

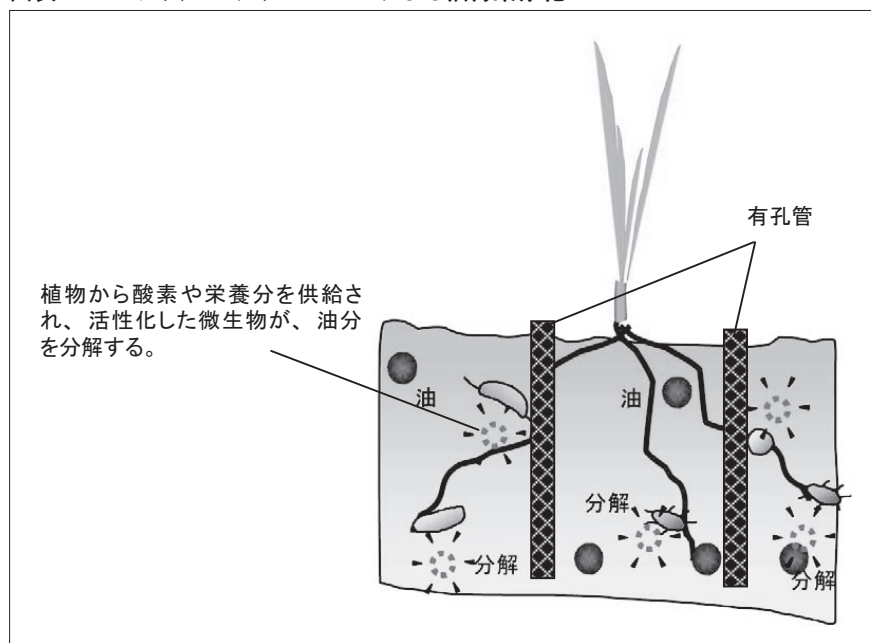
図表 12 は、油汚染土壌でイタリアンライグラスの育成に成功した

図表 11 土壌汚染浄化のニーズ



参考文献¹¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 12 ファイトレメディエーションによる油汚染浄化



参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

土壌中の有害物質が様々な経路を通じて人の健康に影響を及ぼすことである。本稿では触れていないが、土壌汚染には人為的な原因ではなく自然に由来するものも少なくない。よって土壌汚染対策の本来の目的は、汚染土壌をこの世から失くすことではなく、汚染物質に起因した悪影響の可能性を人の健康に問題の出ないレベルまで下げる、すなわち環境リスクを許容範囲内に抑制することである。欧米ではこのような環境リスクという考え方が我が国より早く導入されており、環境リスクに関する研究や制度化が進んでいる¹⁶⁾。

我が国でも社団法人土壌環境センターや大学等の研究機関で、環境リスクに関する検討が始まったところである。環境リスク評価は、汚染物質の汚染源での値で一律評価するのではなく、人への暴露経路を考慮してリスクを評価するものである。土壌環境センターは、いち早く環境リスク評価の重要性を指摘し、我が国の土壌環境対策におけるリスク評価のあり方に関する提言¹⁷⁾としてまとめ、このようなリスク評価に関する情報を広く社会的に発信すべきとしている。

報告例¹⁵⁾の図である。この例では、一定の間隔で有孔のパイプを埋設し、通気性を上げることで、微生物の生育環境を整え、油汚染土壌を浄化することができた。

汚染物質に適した植物の発見についても、多くの報告例があるが、実際の汚染区域において浄化用の植物を栽培する段階まで進んでいない。油汚染土壌の浄化に特化した栽培手法の報告例も前記の例のみで他にはない。また重金属の吸

収の場合には、吸収後の植物の処理方法も確立していない。これらは今後の課題である。近い将来、国内でもブラウンフィールドの増加が問題になってくると思われるため、この技術のノウハウ蓄積に近々に取り組んでおく必要がある。

3-3-3 汚染のリスクという考え方

土壌汚染による根本的な問題は、土壌汚染の存在そのものではなく、

4 おわりに

2002年の土壤汚染対策法の制定以降、土壤汚染の調査と処置が進んだことは明らかである。また2010年の法改正により調査の範囲が広がるため、今後は汚染箇所がより多く判明していくと考えられる。資産リスクの回避のための自主調査も増加の傾向にあると推測される。

これまで明らかでなかった土壤汚染の実態が判明することは、周辺住民などの関係者にとって、たいへん意義のあることである。しかし、経済評価の結果により、汚染された土地が放置され使用されないことは、国土の狭い我が国にとって大きな損失である。ファイトレメディエーションをはじめとした低コスト工法や、より確実な浄化を目指す技術の確立と共に、

より合理的な観点から土壤汚染対策を進めることが、ブラウンフィールド減少の一助になると考えられる。特にノウハウ蓄積を伴う長期間を要する技術開発については、計画的に進める必要がある。それには現実的に広大な汚染土壌を所有している企業等の協力も不可欠である。

一方、海外では天災や紛争などの原因で汚染された土壌も多い。我が国と気象条件の異なる土地では諸条件が異なるが、このような土地で浄化試験を行い、浄化のノウハウが蓄積できれば、グローバルな浄化技術確立の一助となる。仮に国土面積に余裕があり、まだブラウンフィールドがそれほど問題視されていない国々においても、安価な浄化工法であるならば対策

が実施される可能性がある。我が国で開発された技術が、国内に留まらず適用範囲が世界に広がっていくことを期待する。

謝辞

本稿の執筆にあたり、株式会社イー・アール・エス 中村直器執行役員、株式会社間組 吉村和彦部長、DOWAエコシステム株式会社 鎌田雅美部長、独立行政法人土木研究所 森啓年主任研究員、株式会社大林組 峠和男部長、中外テクノス株式会社 藤原和弘室長、他の皆様には貴重なご意見や資料を多数頂戴致しました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：環境基本計画、2006
- 2) 宮本和明：汚染された土壤環境の対策技術の動向、科学技術動向 No.12、2002.3
- 3) 土壤環境施策に関するあり方懇談会：土壤環境施策に関するあり方懇談会報告書、2008
- 4) 土木学会：土壤汚染の調査・対策に関する Q&A 集、2009.7
- 5) 環境省：平成 19 年度土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果、2009.3
- 6) 環境省 中央環境審議会土壤農薬部会 土壤汚染技術基準等専門委員会：油汚染対策ガイドライン ― 鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方―、2006.3
- 7) 社団法人土壤環境センター：土壤汚染状況調査・対策に関する実態調査結果、2006
- 8) 環境省 土壤汚染をめぐるブラウンフィールド対策手法検討調査検討会：土壤汚染をめぐるブラウンフィールド問題の実態等について（中間とりまとめ）、2007.3
- 9) 社団法人土壤環境センター：土壤汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説、2003.9
- 10) 土木学会：土壤・地下水汚染対策講習会、2009.10
- 11) 中外テクノス株式会社 ホームページ <http://www.chugai-tec.co.jp>
- 12) 田本修一：ファイトレメディエーション（植物を用いた地盤の浄化法）について、寒地土木研究所月報、2007.3
- 13) 財団法人エンジニアリング振興協会：平成 16 年度植物利用による有害物質除去技術に関する調査研究報告書、2005
- 14) 水野隆文：東海三大学 新技術説明会、2009.6
- 15) 海見悦子、鎌田茂樹、玉置雅彦、岸正博、小野間満、山崎直人：ファイトレメディエーションによる工場跡地油汚染土壌の浄化、第 15 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会、2009.6
- 16) 社団法人土壤環境センター：実務者のための『土壤汚染リスク評価』活用入門、2008.8
- 17) 中島誠、奥田信康：土壤汚染対策におけるリスク評価の適用性の検討（その 6）―我が国の土壤汚染対策におけるリ

スク評価の活用に向けて一、第 15 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、2009.6

執筆者プロフィール



武井 義久

環境・エネルギーユニット
科学技術動向研究センター
特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

石油会社において、石油精製設備の操業管理、石油備蓄の基地運営、新規事業の開発業務などに従事。現在、環境・エネルギー分野で、低炭素社会を実現するための科学技術と政策に興味を持ち、調査研究を行っている。

海洋酸性化研究の動向

河野 健
客員研究官

1 はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC^①) 第4次評価報告書¹⁾では、「気候システムの温暖化には疑う余地がなく、20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどが人為起源の温室効果ガス濃度の増加によってもたらされた可能性が非常に高い」とされている。二酸化炭素は最も重要な温室効果ガスであり、大気中の二酸化炭素濃度は、「1750年以降の人間活動の結果、大きく増加してきており、氷床コアから決定された、工業化以前の何千年にもわたる期間の値をはるかに超えている」とされている。即ち、「工業化以前の二酸化炭素濃度が280ppmであったのに対し、2005年には379ppmに達して

いるが、これは、氷床コアから決定された過去65万年間における二酸化炭素濃度の自然変動の180ppmから300ppmをはるかに上回っている」と報告されている。

温室効果ガスの排出の増加は、海洋や大気平均気温のさらなる上昇や海面の水位上昇を引き起こすと考えられているが、それ以外にも海洋の環境に大きな影響を与えることが懸念されている。それは海洋の酸性化である。現在、海水のpHは7.6から8.2程度で、弱アルカリ性であるが、大気中の二酸化炭素濃度が増えると海洋にとけ込む二酸化炭素も増え、その結果、海水をより酸性に近づけてしまうからである。第4次評価報告

書¹⁾でも、「1750年以降の人為起源炭素の吸収は、海洋をより酸性化させ、pHは平均で0.1減少した」とされており、「文書で立証されていないながらも、海洋性殻形成生物とそれに依存する生物種に対して悪影響を与えることが予想される」とされている。近年では、そのほかの研究コミュニティからも、相次いで、海洋酸性化の進行が生態系に影響を与える可能性がある、との声明が発表され、警鐘が鳴らされている。

本報告では、海洋酸性化研究の重要性と国内外の海洋酸性化研究の動向について詳しく述べる。

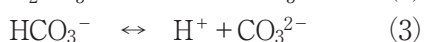
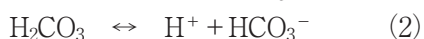
2 海洋酸性化研究の重要性

2-1

海洋酸性化のしくみ

海水にとけ込んだ二酸化炭素ガス(溶存二酸化炭素)は水と反応して炭酸(H_2CO_3)となり、電離して炭酸水素イオン(HCO_3^-)および炭酸イオン(CO_3^{2-})に形を変え、次

式のような平衡関係を保った溶存物になる。



炭酸イオン、炭酸水素イオン、溶存二酸化炭素を合わせて全炭酸と称する。また、炭酸水素イオン

と炭酸イオンの2倍の和を炭酸アルカリ度と言う。また、溶存二酸化炭素、炭酸、炭酸水素イオン、炭酸イオンを総称して炭酸系物質と言う。

二酸化炭素が海洋中にさらにとけ込むと、(1)と(2)の反応が右に進み、水素イオン濃度が増加する。増加した水素イオンを使い(3)の反応は左の方向へ進み、炭酸イオン

2-2

海洋酸性化が
生態系に与える影響

が減少する。その結果、炭酸水素イオンは増加し、炭酸イオンは減少する。例えば、大気中の二酸化炭素濃度が280ppmの時、炭酸は $8\mu\text{mol/kg}$ 、炭酸水素イオンが $1617\mu\text{mol/kg}$ 、炭酸イオンが $267\mu\text{mol/kg}$ となるが、大気中の二酸化炭素濃度が560ppmとなると、それぞれ $15\mu\text{mol/kg}$ 、 $1850\mu\text{mol/kg}$ 、 $176\mu\text{mol/kg}$ となるという理論計算²⁾もある。pHは水素イオン濃度の指標で、水素イオン濃度が増加すると低下する。上述の理論計算²⁾では、大気中の二酸化炭素が280ppmの時のpHは8.15となり、560ppmの時には7.91と計算される。中性の定義は $\text{pH}=7$ とされているので、実態としては、現在弱アルカリ性の海洋がより中性に近づくことになるが、酸性度が増すことを意味するので、このような状態変化は一般的には「海洋酸性化」と称されている。

図表1は、ハワイ付近において大気中の二酸化炭素濃度と海洋表面の二酸化炭素分圧およびpHを比較したものである³⁾。大気中の二酸化炭素の上昇に伴って海洋表面の二酸化炭素分圧も上昇し、pHが序々に下がっていることがわかる。

海洋には、殻や骨格が炭酸カルシウムから出来ている生物が生息している。例えば、サンゴの骨格はアラゴナイト(あられ石)という炭酸カルシウム結晶で構成されており、二枚貝の殻や円石藻という植物プランクトンの殻などは、カルサイト(方解石)と呼ばれる炭酸カルシウム結晶から出来ている。海洋の表層は、一般に炭酸イオンもカルシウムイオンも十分に濃度が高く、固体の炭酸カルシウムが化学的に安定して存在できる状態にある(炭酸カルシウムが過飽和の状態にある、と言う)。飽和度が1以下となれば、炭酸カルシウムの殻や骨格を維持しにくくなる可能性もあり、これらの生物にとってはこれまでに比して生息しにくい環境になると考えられる。図表2は、2006年9月にベーリング海東部陸棚域で観測された大増殖時に採取した円石藻の一種である。外側の円盤状の殻(円石)が炭酸カルシウムによって出来ている。左側

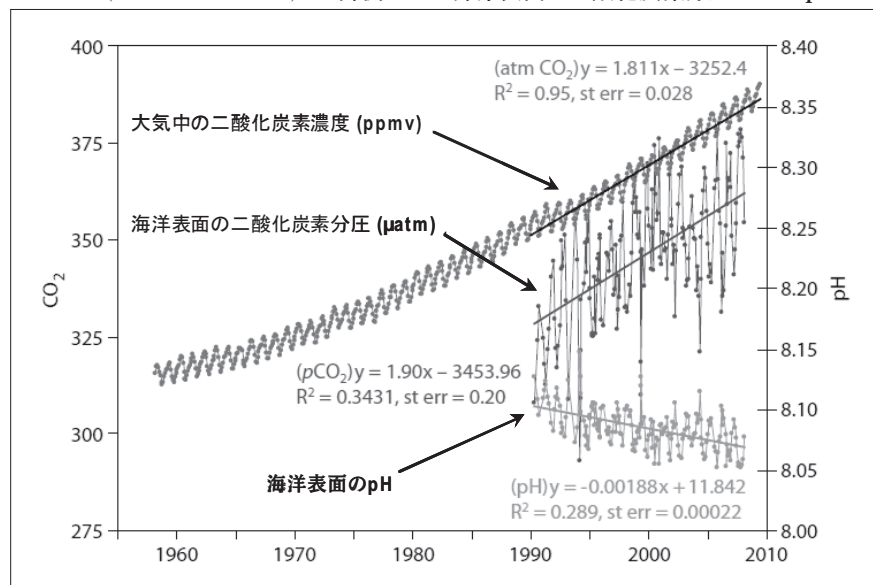
の写真が健全な個体である。右側の個体は、外側の殻に変形がみられる。この個体が実際に海洋酸性化によって溶解したものと必ずしも断定はできるわけではないが、大増殖の際、活発に円石を作り出している時には局所的にpHが低下する場合があるという見方もあり、炭酸カルシウムの飽和度が下がれば、右のような状態になり易くなるであろうと考えられている。

炭酸カルシウムの殻や骨格をもつ生物にとって棲みにくい環境になれば、以下のように特に生態系に影響を及ぼす可能性が懸念されている。

- ・植物プランクトンは食物連鎖の最下位に属する一次生産者である。また、動物プランクトンや貝類にも炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物がいる。食物連鎖の下位に属する生物相が変化すれば、上位の生物相にも変化を引き起こし、水産業に影響を与えるなどの食糧問題につながる可能性がある。
- ・生物多様性に影響を与える可能性がある。例えば、サンゴ礁に影響を及ぼせば、サンゴそのものだけではなく、サンゴ礁に棲む生物にも影響する。

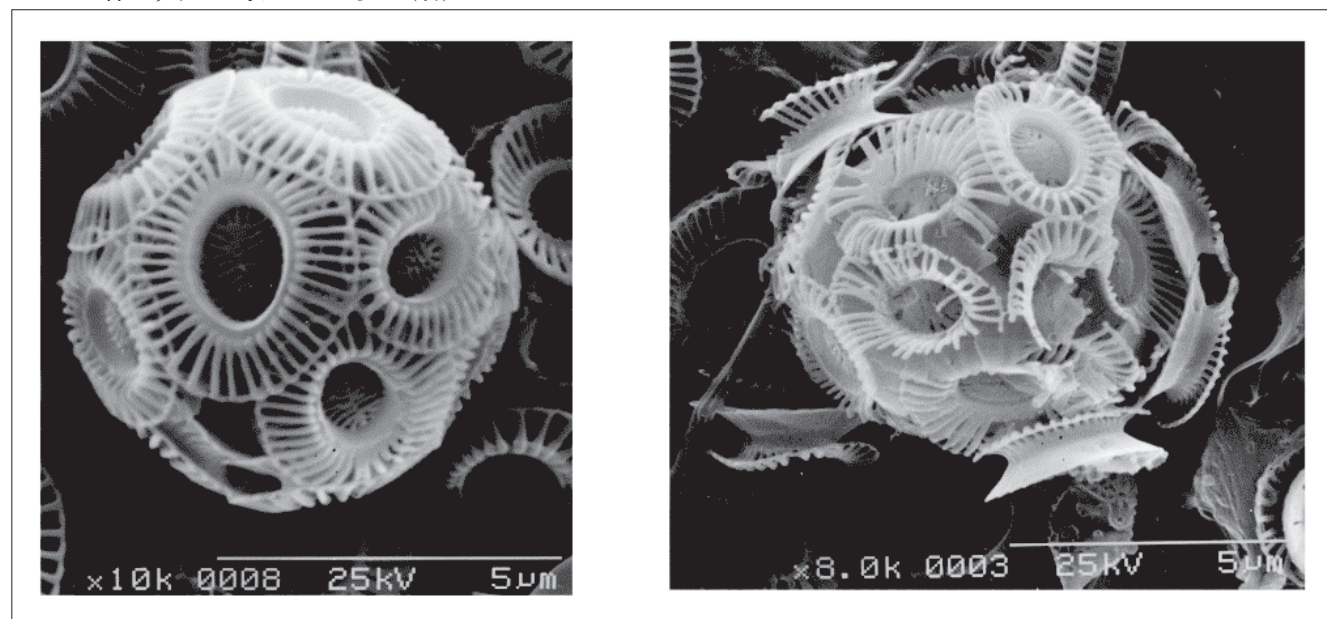
しかし、これらは全て定性的な傾向あるいは可能性である。研究室で行われる実験などで高二酸化炭素分圧下で培養すると円石藻の生育が阻害されるという研究などはあるものの⁴⁾、必ずしも十分な知見が蓄積されているとは言えない状態である。飽和度が1以下になったからといって、必ずしも直ちに貝や植物プランクトンの殻が溶け出すというわけでもない。また飽和度が1以上の状態であっても、低下しただけで影響がでる場合もある。実際の海洋においてどのような生物がどの程度の影響を受けるのかについてはまだほとんど未解明と言っても過言ではな

図表1 マウナロア山上で観測された大気中の二酸化炭素濃度とハワイ近海の観測点 (Station ALOHA) で計測された海洋表面の二酸化炭素分圧および pH



出典：参考文献³⁾

図表2 2006年9月にベーリング海東部陸棚域で観測された大増殖時に採取した円石藻の一種。健全なもの（左）と溶解の影響をうけたと考えられるもの（右）



出典：(独)海洋研究開発機構提供資料

く、特に定量的な議論には全く至っていない。

2-3

海洋の炭素循環が 海洋酸性化に与える影響

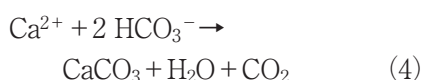
海洋酸性化は大気中に放出された人為起源二酸化炭素の増加によってもたらされると考えられている。大気中の二酸化炭素は色々なプロセスを経て海洋内部に取り込まれる⁵⁾。

まず海洋表面におけるガス交換でとけ込むが、これには大気—海洋間の二酸化炭素濃度差と、海水に対する二酸化炭素の溶解度が鍵となる。溶解度は水温が低いほど高くなる。また、冷却や結氷による高塩分水の生成により重くなった海水が表層から切り離され、中・深層へ輸送されるが、この時、同時に海洋表面でとけ込んだ二酸化炭素を中層・深層に運ぶ。このように大気からのとけ込みと循環による中・深層への輸送を広義に溶解ポンプと呼ぶ。

また、生物活動も重要な要素で

ある。有機炭素などによる軟組織を作る場合と、無機炭素による硬組織を作る場合の2種類の過程がある。植物プランクトンは光合成によって二酸化炭素を固定(有機炭素を作る)する。その遺骸などが粒子となって中・深層へ輸送される。これを生物ポンプという。この過程では、海洋表層では植物プランクトンが海洋中から二酸化炭素を除去し中・深層へ運ぶ効果がある。中・深層へ運ばれている間や海底堆積物の上部でバクテリアにより酸化され、無機の炭素となって海洋中の全炭酸を増加させる(全炭酸が増加すると二酸化炭素を溶かす能力は減ずる)。

また、生物活動によって生成された炭酸カルシウムの殻や骨格(無機炭素)も、死骸や糞などの粒子となって海底へ沈降する。カルシウムイオン(Ca^{2+})から炭酸カルシウム(CaCO_3)の殻や骨格を作る時には、炭酸水素イオンも使われ、この際に二酸化炭素を放出する(式(4))。

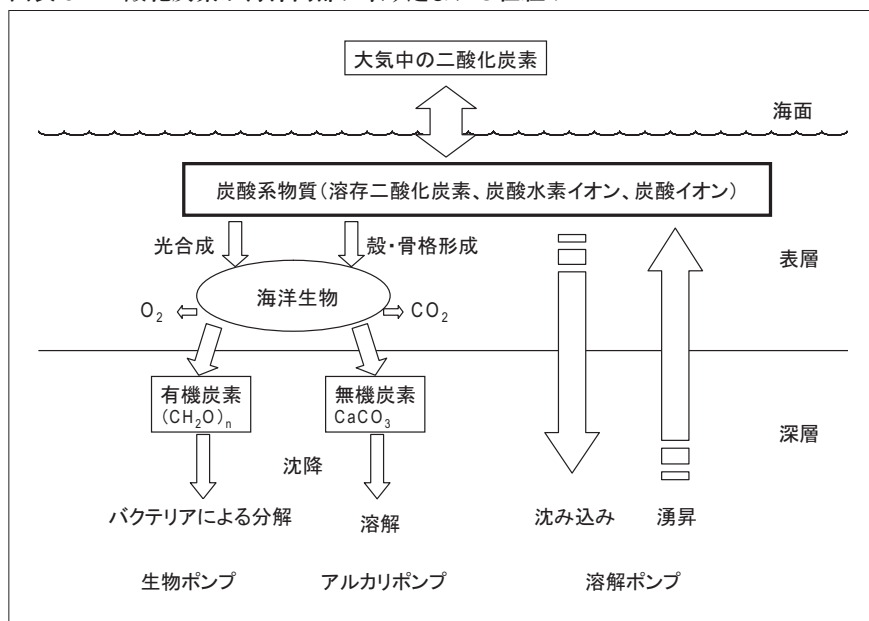


炭酸カルシウムは中・深層に運ばれると未飽和なので溶解し、海水中のアルカリ度を高くする。アルカリ度が高くなると二酸化炭素を溶かす能力は増加する。この過程はアルカリ度の変化を伴うためアルカリポンプと呼ばれている(図表3)。

二酸化炭素の吸収は、海洋におけるこれらの物理的・化学的・生物学的な複合的なプロセスを経て決まるため、一様ではない。図表4は、1970年以降の約300万点の海洋表層の二酸化炭素分圧のデータを元に計算した、1年間あたりの大気—海洋間の二酸化炭素のやりとり(二酸化炭素フラックス)を示したものである⁶⁾。これは、いわゆる気候値で、年による吸収の度合いの違いなどは表現されていない。海洋酸性化の実態把握のためには、この気候値からのずれなどを詳細に調べる必要がある。

これらによってわかるように、海洋酸性化研究には、大気中の二酸化炭素増加のモニターばかりではなく、海洋物理・化学・生物を複合した全球規模の海洋観測研究が必要である。国際的には、国際科学会議(ICSU^②)傘下の海洋研究

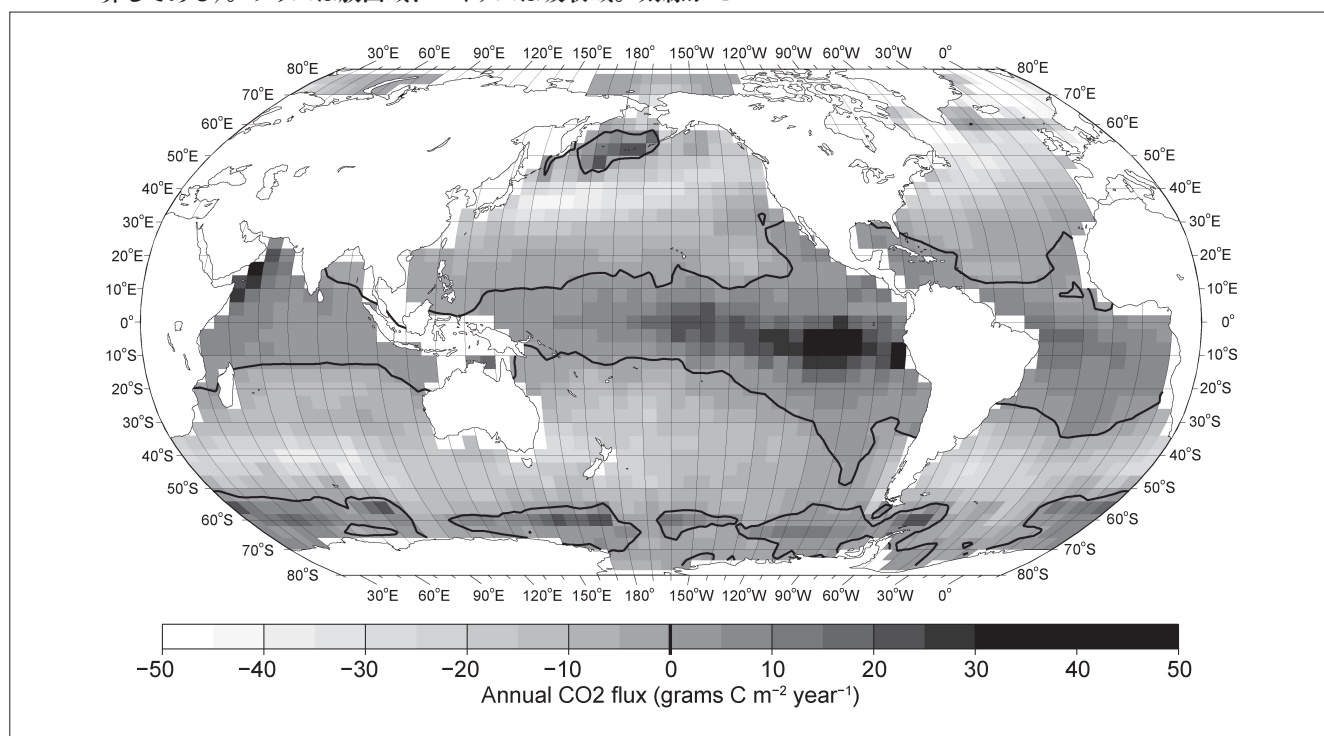
図表 3 二酸化炭素が海洋内部に取り込まれる仕組み



科学技術動向研究センターにて作成

科学委員会(SCOR^③)および国際連合教育科学文化機関(UNESCO^④)傘下の政府間海洋学委員会(IOC^⑤)が共同でサポートしている International Ocean Carbon Coordinate Project (IOCCP) が、世界各国の二酸化炭素に関連する海洋観測の調整と情報交換の場を、Web ベースで提供している。実際のデータは CLIVAR Carbon and Hydrographic Data Office (CCHDO) と Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) から提供されている。

図表 4 過去約 30 年の観測データから算出した 1 年当たりの平均的な二酸化炭素吸収量(二酸化炭素フラックス。炭素量に換算してある)。プラスは放出域、マイナスは吸収域。太線がゼロ

参考文献^⑥を基に科学技術動向研究センターにて作成

3 海洋酸性化研究の国際的状況

3-1

国際的な提言

海洋酸性化は比較的新しい研究分野と言える。そのため、前述のように海洋酸性化の影響に関して具体的あるいは定量的な議論には至っていない。しかし、海洋生態

系に何らかの影響を与えることは定性的には明らかと考えられ、研究者コミュニティから相次いで国際的な提言がなされている。

1) モナコ宣言⁷⁾

2008年10月に、UNESCOや全米科学財団(NSF[®])の後援の下、モナコにおいて開催された高二酸化炭素環境における海洋(The Ocean in a High-CO₂ World)に関する第2回国際シンポジウムにおいて、参加した研究者らが、海洋酸性化に対する懸念とその現状と影響の研究を推進させるよう政策決定者に勧告するモナコ宣言を発表した。

2) 国際学術団体インターアカデミーパネル(Inter Academy Panel)⁸⁾

2009年6月に、国際学術団体インターアカデミーパネルが「大気中の二酸化炭素増加の結果、海洋酸性化が進行中であり、生物多様性に深刻な影響を及ぼす可能性がある」との懸念を示している。そして、二酸化炭素排出を減らすことのみが有効な対応策であり、2009年12月の「気候変動枠組条約第15回締約国会議」において酸性化の脅威が認識されるべきだ、と呼びかけた。

3) 生物多様性条約事務局⁹⁾

2009年12月に、生物多様性条約事務局が「海洋酸性化は復元には少なくとも数万年が必要で、現実の海洋生態系へのダメージは、緊急かつ急速な二酸化炭素排出削減によってのみ避けられる」との声明を発表した。

3-2

欧米における研究の推進

1) 全米科学アカデミー¹⁰⁾

米国では、海洋大気庁(NOAA^⑦)とNSF[®]から委託をうけた全米科学アカデミーが2008年9月から18カ月の予定で、「Development of an Integrated Science Strategy for Ocean Acidification Monitoring, Research, and Impacts Assessment」と称する包括的なプロジェクトを実施している。このプロジェクトは、海洋酸性化が漁業や希少生物、サンゴやその他の天然資源に与える影響を調査するものである。海洋物理、海洋化学、生物学、政治学、工学などの学位を持つ12名(2009年2月現在)の専門家による委員会により運営されている。委員会は、海洋酸性化の生態系に対する影響に関する知識をレビューし、そのうち重要かつ鍵となる研究を洗い出し、最終的に政策決定者やサイエンスコミュニティに対して研究戦略を提示する計画となっている。

2) European Project on Ocean Acidification (EPOCA)¹¹⁾

欧州では、ベルギー、フランス、ドイツ、アイスランド、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、スイス、英国の9カ国から27の研究機関が参画し、海洋酸性化による生物学

的・生態学的・地球化学的・社会的な影響の理解を深めるための4年間の研究計画“European Project on Ocean Acidification”を2008年6月に発足させた。研究課題としては、以下の4つを挙げている。第1は、過去から現在までの海洋の時空間的な変化を知るための、海洋化学研究と主要な海洋生物についての生物地理学的研究、第2は、海洋酸性化が海洋生物にどのようなインパクトを与え、生態系にどのような影響を及ぼすかを定量化する研究、第3は、海洋酸性化がどう海洋生物地球化学と生態系に影響するかをよりよく説明するために、モデルを改良すること、第4は、これらの成果から、不確かさやリスクなどを評価し、政策決定者や一般社会向けに統合し提示すること、である。研究を推進するため、メンバーはコンソーシアムを組み、Executive Board、Science Steering Committeeを組織している。研究の方向やマネジメントについてScience Steering Committeeが助言し、コンソーシアムの定期会合で決定する。この決定はExecutive Boardによって実現化される。全体調整のため、フランス国立科学研究センターとパリ第6大学共同の研究ユニットである海洋研究室にProject Officeを持ち、担当者を置いている。また、データベースも公開し、啓蒙活動にも力を入れている。

4 日本における海洋酸性化研究

4-1

実験的研究

1) 海洋酸性化が石灰化生物に与える影響の実験的研究^{12, 13)}

この研究は、環境省地球環境研究総合推進費の課題で、2008年度から2010年度までの3カ年計画で実施されている。沿岸に生息する生物のうち、ウニ、貝類、サンゴなど炭酸カルシウムの殻や骨格をもつ沿岸性底生生物を、二酸化炭

素濃度を高めた海水で飼育する実験を行っている。二酸化炭素濃度の微少な変化を制御できる機器を開発し、現実の海洋で起こると想定されている状況を再現することで、生物に与える影響を評価する。この研究では、「海洋酸性化が水産

資源として重要な生物の幼生期に与える影響を明らかにすることから、栽培漁業技術を利用して漁業生産を確保するという適応策の可能性を考える」という、現状把握から一歩踏み込んだ目的を設定している。研究体制は、(独)国立環境研究所、京都大学、(独)水産総合研究センター、産業技術総合研究所、琉球大学から構成されている。国際的には IOCCP と協力している。

2) 海洋酸性化の実態把握と微生物構造・機能への影響評価に関する研究¹⁴⁾

この研究も環境省地球環境研究総合推進費の課題で、2008年度から2010年度までの3カ年計画で実施されている。pHを精密に測定する手法を開発し、また既存のデータを収集し統合して酸性化の実態を把握すること、さらに、海洋酸性化が海洋微生物に及ぼす影響について、主として培養実験によって明らかにすることを目的としている。この成果に基づいて、最終的に「国際的な二酸化炭素排出削減施策への政策支援を行う」としている。この研究の成果として、すでに日本近海でのpHの低下が明らかとなっている(後述)。研究体制は筑波大学、気象研究所、(財)日本

水路協会から構成されており、国際的には ICSU^②が主催する地球圏—生物圏国際協同研究計画(IGBP^⑧)および SCOR^③がともに後援する海洋生物地球化学・生態系統合研究(IMBER^⑨)の関連研究と位置づけられている。

4-2

実海域観測による研究の成果

1) 外洋における炭酸カルシウムの飽和度

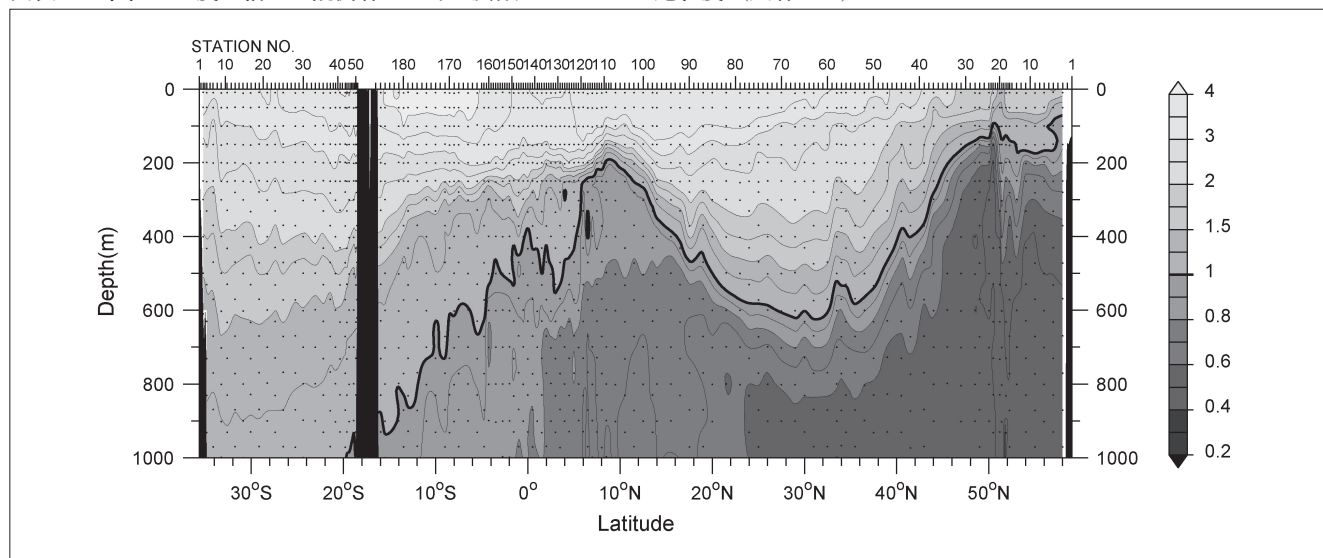
第2章で述べたように、海洋生態系への影響を測る指標の一つとして炭酸カルシウムの飽和度が挙げられる。飽和度が1以下は炭酸カルシウムを殻や骨格とする生物にとってはより好ましくない状況であると考えられている。炭酸カルシウムの飽和度は、現場の水温および圧力、炭酸イオンおよびカルシウムイオンの濃度で決まるが、炭酸イオンとカルシウムイオンの濃度が一定の場合、水温が低くなると飽和度が下がり、圧力が高くなっても飽和度は下がる。カルシウムイオンは現場の塩分から推定することができる。そのため、一般的な圧力、水温、塩分のほかに

炭酸系物質のパラメータ(全炭酸、二酸化炭素分圧など)を計測することで、飽和度を計算によって求めることができる。

図表5は海洋地球研究船「みらい」によって2007年に実施された、東経179度に沿った観測線における炭酸カルシウム(アラゴナイト)の飽和度を示す。縦軸は深度、横軸が緯度である。太い線が飽和度1の線を示す。飽和度1の線より浅い方は、アラゴナイトが過飽和の状態であることがわかる。炭酸カルシウムの殻や骨格をもつ生物は、太陽の光が届く浅い領域(有光層：外洋では高々深度200m程度)に多く生息するため、まだ現状の外洋は、必ずしも「酸性化が進行し危険な状態」というわけではない。

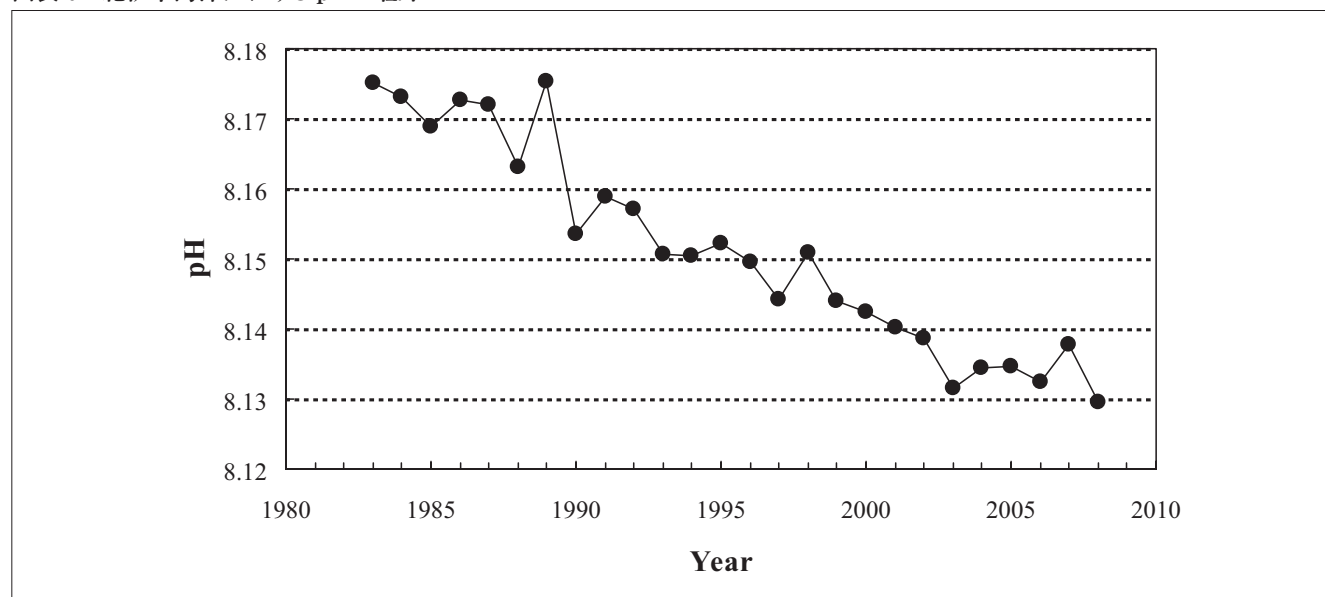
しかし、同じような観測線は、1992年から1993年に米国の海洋調査船によって調査されている。その時に得られた炭酸系物質のパラメータやそれらから計算された炭酸カルシウムの飽和度を今回の結果と比較すると、人為起源二酸化炭素濃度が高くなっている所で飽和度が下がっている、という事実が判明している。

図表5 東経179度に沿った観測線における炭酸カルシウムの飽和度(太線が1)



出典：(独)海洋研究開発機構提供資料

図表6 紀伊半島沖における pH の低下

参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成2) 日本近海における pH¹⁵⁾

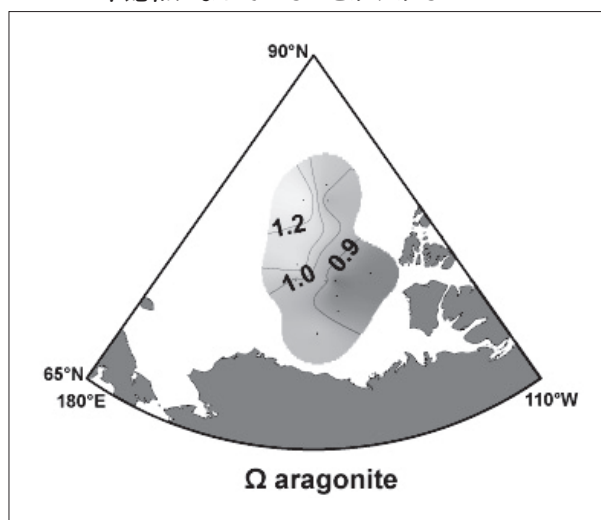
気象庁は、海洋気象観測船によって毎年定期観測を行っている。筑波大学と気象研究所は前述の環境省地球環境研究総合推進費によって、この定期観測の結果を解析した。その結果、東経約 137 度、北緯 30 度の紀伊半島沖の海洋表面では、過去 26 年間に pH が約 0.04 低下したことが判明した(図表 6)。産業革命後 200 年間で pH の低下は 0.1 程度と考えられているので、近年は pH 低下のペースが速まっている、と結論づけられている。

3) 北極海における炭酸カルシウムの飽和度

カナダ漁業海洋省海洋科学研究所と(独)海洋研究開発機構の共同研究チームは、北極海において炭酸カルシウムの飽和度が、1997 年に比べ 2008 年には低下しており、さらに炭酸カルシウムの飽和度が 1 より小さい海域が、北極海カナダ海盆域中央部に広がっていることを示した¹⁶⁾(図表 7)。

現在、北極海では急激な海水の融解が問題となっている。表面を覆っていた氷がとけ、海水が直に大気と接触するようになり、大気—海洋間のガス交換が活発化する

図表 7 2008 年にカナダ砕氷船観測で得られた炭酸カルシウムの飽和度の分布図。点は観測点、北極海カナダ海盆中央部においては、炭酸カルシウムが未飽和になっていることがわかる

出典：(独)海洋研究開発機構資料提供 (参考文献¹⁶⁾)

ことも酸性化を進める一つの要因となっている。

また、海水が溶けた水(海水融解水)は真水に近く、炭酸イオンおよびカルシウムイオン濃度が低くアルカリ度も低い。この海水融解水が混ざるため、海水が希釈され、飽和度を小さくする効果がある。北極海カナダ海盆で飽和度が 1 以下になる海域ではアルカリ度も低い。これは、この海域の飽和度の低下に、海水融解が強く影響していることを示している。

4-3

数値シミュレーション
による研究成果

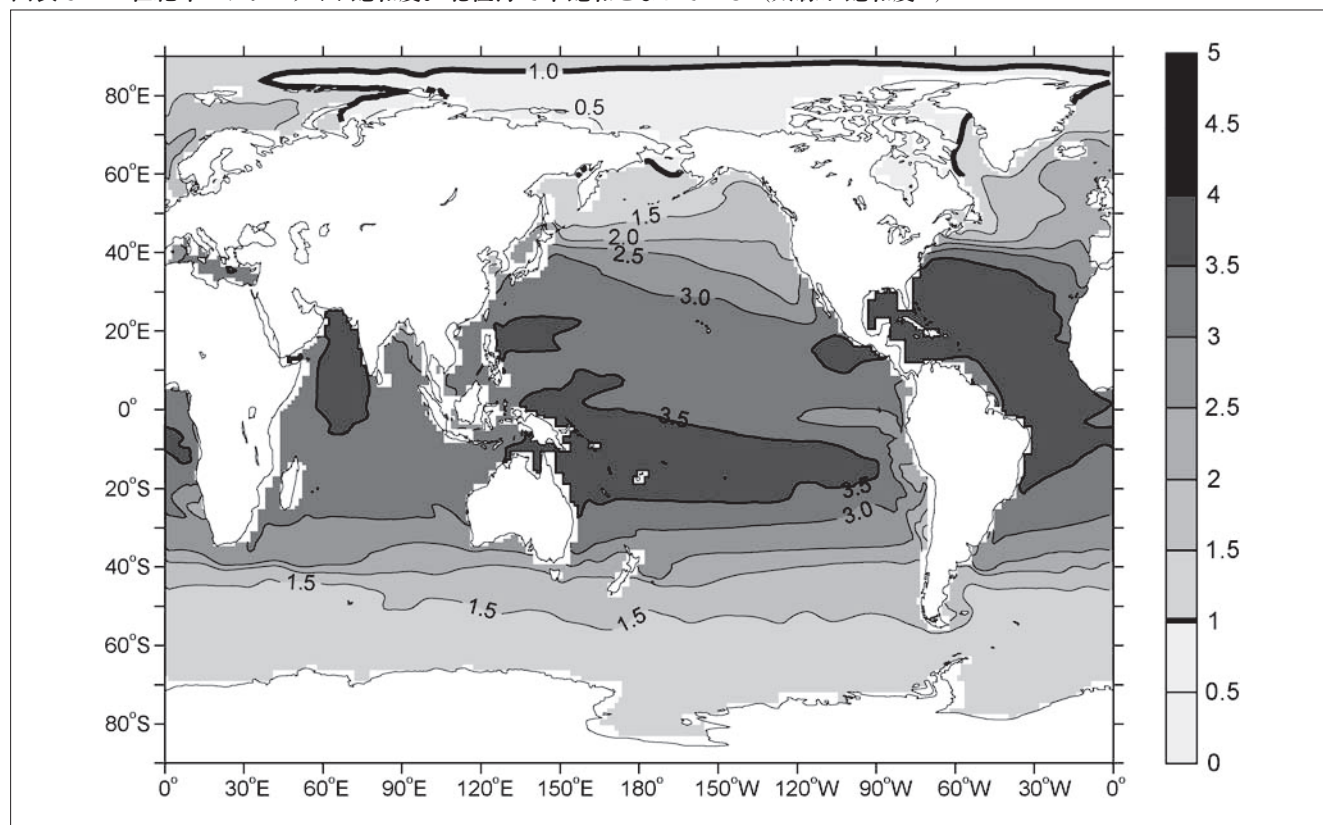
2013 年から 2014 年に発表が予定されている IPCC^①第 5 次評価報告書へ寄与し、気候変動対応策へ科学的基礎データを提供することを目的として、文部科学省によって「21 世紀気候変動予測革新プログラム」が 5 カ年計画(2007 年度～2011 年度)で実施されている¹⁷⁾。

このプログラムでは、IPCC^①で提示されている種々の二酸化炭素排出のシナリオに基づいた将来予測を、「地球シミュレータ」を活用して算出している。この中では、炭酸カルシウムの飽和度の変化も予測されている。

図表8は、大気中の二酸化炭素濃度が450ppmで安定した場合の計算例であり、21世紀末のアラゴナイト飽和度の分布を示している。酸性化の進行は基本的に大気中の二酸化炭素濃度の上昇に依存するが、北極海・南極海や北部北太平洋な

ど、高緯度の海域で炭酸カルシウムの未飽和の状態がより早くあらわれると算出されている。北極海では、温暖化による海水の融解によって酸性化が進行するとされており、これは、前述の北極海における観測結果ともつじつまが合う。

図表8 21世紀末のアラゴナイト飽和度。北極海で未飽和となっている（太線が飽和度1）



出典：(独)海洋研究開発機構（参考資料¹⁷⁾：21世紀気候変動予測革新プログラムによる計算結果を改変）

5 おわりに

海洋酸性化は比較的新しい研究分野である。定性的には、酸性化は、炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物に影響を及ぼし、またpHが低下すること自体がそのほかの海洋生物に影響を及ぼす。その結果、食糧問題など我々の生活に影響を及ぼす可能性もあるが、新分野であるため、酸性化の現状に関する知見も、また、酸性化が生態系に与える影響に関する知見もまだ不十分である。海洋酸性化は大気中に放出された人為起源二酸化炭素の増加によってもたらされると考

えられている。大気中の二酸化炭素は、さまざまな物理的・化学的・生物学的なプロセスを経て海洋内部にとりこまれるため、海洋酸性化の研究には、広い視野に立った包括的な研究が必要である。

日本では、4-1章で述べた環境省地球環境研究総合推進費による取り組みが比較的規模が大きく、酸性化が生物に与える影響を実験的に調査する研究と実海域での現状を把握する調査研究、および必要な機器開発を組み合わせたものとなっている。今後は、海洋酸性

化が生物に及ぼす影響、ひいては我々の社会生活に及ぼす影響までを考慮すれば、生態学的な基礎研究に加えて社会学的な視点の研究も必要となる。IPCC^①第4次評価報告書に引用されている論文の調査¹⁸⁾によれば、日本は影響調査(IPCC^①の第2作業部会の分野)の活動が弱いことが指摘されている。我が国でも欧州に見られるような、社会的影響調査も視野に入れた分野横断かつ機関横断的な研究の枠組みがより必要とされるだろう。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、(独)海洋研究開発機構の深澤理郎領域長、才野敏郎プログラムディレクター、原田尚美チームリーダー、菊地隆チームリーダー、村田昌彦主任研究員、石田明生主任研究員、西野茂人技術研究主任の協力を得ました。また、カナダ漁業海洋省海洋科学研究所の川合美千代博士から貴重なコメントを頂きました。気象研究所の緑川貴室長からは資料とデータを提供して頂きました。ここに感謝いたします。

略号

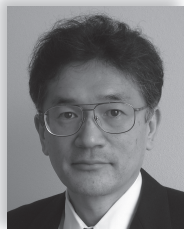
- ① IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
- ② ICSU : International Council for Science
- ③ SCOR : Scientific Committee on Oceanic Research
- ④ UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
- ⑤ IOC : Intergovernmental Oceanography Commission
- ⑥ NSF : National Science Foundation
- ⑦ NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
- ⑧ IGBP : International Geosphere-Biosphere Programme
- ⑨ IMBER : Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research

参考文献

- 1) IPCC 編、気候変動 2007 IPCC 第 4 次評価報告書—政策決定者向け要約— 邦訳版
- 2) Feely, A. R., C. L. Sabine, T. Takahashi, and R. Wanninkhof : Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean : The Global CO₂ Survey, *Oceanography*, 14 (4) , 18 - 32, 2001
- 3) Feely, A. R., S. C. Doney, and S. R. Cooley : Ocean Acidification. Present Conditions and Future Changes in a High-CO₂ World. *Oceanography*, 22 (4) , 36 - 47, 2009
- 4) Riebesell, U., : Effects of CO₂ Enrichment on Marine Phytoplankton. *Journal of Oceanography*, 60, 719 - 729, 2004
- 5) 野崎義行著：「地球温暖化と海」、東京大学出版会
- 6) Takahashi, T. et al. : Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research II*, 56, 554-577, 2009
- 7) モナコ宣言 : <http://ioc3.unesco.org/oanet/Symposium2008/MonacoDeclaration.pdf>
- 8) IAP による声明
: http://www.interacademies.net/Object.File/Master/9/075/Statement_RS1579_IAP_05.09final2.pdf
- 9) 生物多様性事務局声明 : <http://www.cbd.int/doc/press/2009/pr-2009-12-14-marine-en.pdf>
- 10) 全米科学アカデミー : <http://www8.nationalacademies.org/cp/projectview.aspx?key = 49047>
- 11) EPOCA ウェブサイト : <http://www.epoca-project.eu/>
- 12) 環境省地球環境研究総合推進費 研究計画書 (B084)
: http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/jpn/projects_underway/pdf/B084.pdf
- 13) 諏訪僚太ほか、海洋酸性化がサンゴ礁域の石灰化生物に及ぼす影響、海の研究、19 (1)、21 - 40, 2010
- 14) 環境省地球環境研究総合推進費 研究計画書 (F083)
: http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/jpn/projects_underway/pdf/F083.pdf
- 15) 緑川貴ほか、「太平洋における海洋 pH の高精度各層観測による酸性化の実測」、環境省地球環境研究総合推進費「海洋酸性化の実態把握と微生物構造・機能への影響評価に関する研究」中間報告書
- 16) Michiyo Yamamoto-Kawai, F. A. McLaughlin, E. C. Carmack, S. Nishino, K. Shimada : Aragonite Undersaturation in the Arctic Ocean : Effects of Ocean Acidification and Sea Ice Mel, *Science*, 326, 1098 - 1100, 2010
- 17) : <http://www.kakushin21.jp/jp/>

- 18) 前田征児、日引聡、地球温暖化問題に対するサステナビリティサイエンスの研究動向— IPCC 第四次評価報告書に対する日本の貢献度から見た課題—、科学技術動向、84

執筆者プロフィール



河野 健

客員研究官

(独)海洋研究開発機構 地球環境変動領域

プログラムディレクター

<http://www.jamstec.go.jp/rigc/j/occrp/index.html>

専門は海洋学。観測を通じて海洋環境の変動を明らかにする研究に従事。海洋底層の水温上昇と南極オーバーターンの変化を研究している。
東京大学大学院新領域創成科学研究科客員教授。

科学技術動向研究センターとは

2001年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため2001年1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。当センターでは、「科学技術基本計画」の策定に資する最新の科学技術動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供しております。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1

「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

我が国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱し、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布しています。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> においても公開しています。

2

重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

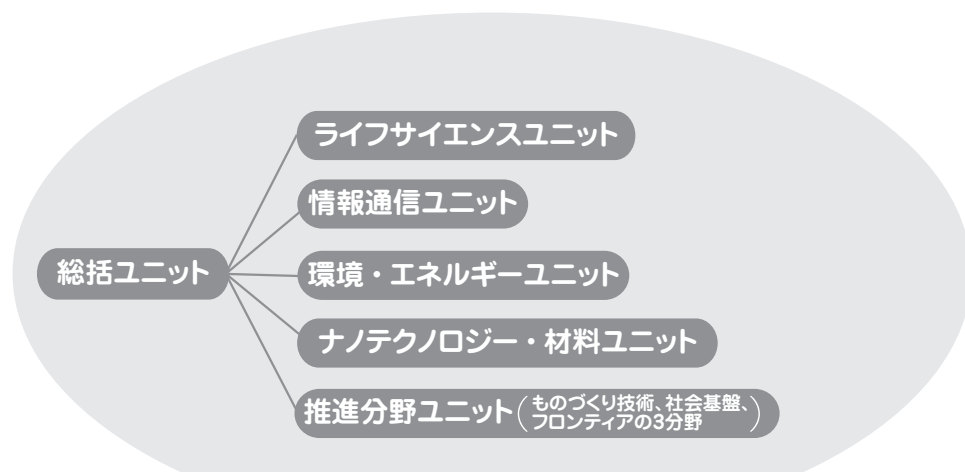
今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、我が国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3

技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法を中心とする科学技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。2005年には2年間にわたった「科学技術の中長期的発展に係る俯瞰的予測調査」を報告しました。



*それぞれのユニットには、職員その他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

（2009年6月1日現在）

Science & Technology Trends

科学技術動向 2/2010



2010年2月号 第10巻第2号/毎月26日発行 通巻107号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター